

31.000 000111097

**STUDI PENGENDALIAN  
FREKUENSI PADA  
PLTA SAGULING MENGGUNAKAN  
PENGATUR LOGIKA FUZZY**

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	13-12-99
Terima dari	H
No. Agenda Perp.	8877

RSE  
629.89  
Roe  
S-1  

---

1998



Oleh :

**ROCHIM**  
Nrp. 2290100115

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
1998**


**STUDI PENGENDALIAN  
FREKUENSI PADA  
PLTA SAGULING MENGGUNAKAN  
PENGATUR LOGIKA FUZZY**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

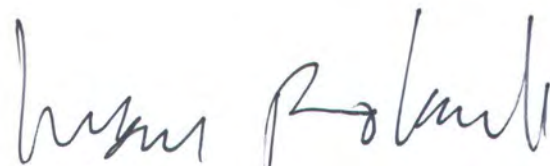
Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing I



( Ir. TEGUH YUWONO )  
NIP. 130604244

Dosen Pembimbing II



( Ir. IMAM ROBANDI, M.T.  
NIP. 131918687

**SURABAYA**  
**Maret 1998**

## **ABSTRAK**

Dalam upaya memenuhi kebutuhan dan tuntutan bidang industri yang makin lama makin meningkat terhadap konsumsi tenaga listrik, diperlukan pengadaan tenaga listrik yang cukup terjamin baik dalam hal kontinuitas maupun kualitasnya.

Untuk mendapatkan kondisi operasi yang terjamin perlu ditunjang dengan sistem kontrol yang handal karena tingkat ketelitiannya banyak menentukan kualitas pengoperasian sistem tenaga listrik.

Salah satu parameter kualitas pengoperasian sistem tenaga adalah frekuensi, yang dalam tugas akhir ini pengendaliannya dikontrol dengan menggunakan logika fuzzy. Logika fuzzy memiliki kelebihan yaitu tidak memerlukan pemodelan sistem, sehingga sangat sesuai untuk sistem yang kompleks.

## **KATA PENGANTAR**

Dengan mengucap puji syukur kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul :

### **STUDI PENGENDALIAN FREKUENSI**

### **PADA PLTA SAGULING**

### **MENGGUNAKAN PENGATUR LOGIKA FUZZY**

Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi S1 pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada penyusunan tugas akhir ini, penulis berusaha menghasilkan karya sebaik mungkin, namun hasil penulisan ini masih terdapat banyak kekurangan. Meski demikian penulis berharap semoga kekurangan tersebut tidak mengurangi arti penulisan tugas akhir ini.

Akhirnya, penulis berharap semoga buku tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai masukan bagi para pembaca, Amin.

Surabaya, Pebruari 1998

Penulis



## UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan terselesaikannya tugas akhir ini, dengan penuh rasa hormat penulis mengucapkan rasa terima kasih yang tulus kepada :

- Bapak Ir. Teguh Yuwono, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro dan Dosen Pembimbing I, yang banyak memberikan bantuan, bimbingan dan pengarahan.
- Bapak Ir. Imam Robandi, MT., selaku Dosen Pembimbing II, yang dengan sabar menuntun, memberi bimbingan dan pengarahan kepada penulis.
- Bapak, Ibu dan saudara di rumah yang memberi bantuan materiil, spirituil dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir.
- Seluruh staf pengajar dan administrasi Jurusan Teknik Elektro yang membantu secara langsung maupun tidak langsung pada penulis.
- Rekan-rekan PKDST yang memberikan dukungan, dorongan dan bantuan yang sangat banyak pada penulis.
- Semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung yang tidak mungkin penulis sebutkan satu persatu.

Semoga segala kebaikan tersebut mendapat balasan dari Allah SWT dan Allah juga memberikan kemudahan bagi anda semua, Amin.

## DAFTAR ISI

JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR NOTASI.....	xi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang dan Perumusan Masalah.....	1
1.2 Tujuan Tugas Akhir .....	3
1.3 Pembatasan Masalah.....	3
1.4 Sistematika Pembahasan.....	3
1.5 Tujuan dan Relevansi .....	5
BAB II PENGATUR LOGIKA FUZZY .....	6
2.1 Himpunan Fuzzy .....	7
2.2 Fungsi Keanggotaan Himpunan Fuzzy.....	8
2.2.1 Definisi Bentuk Numerik .....	8
2.2.2 Definisi Bentuk Fungsi.....	8
2.3 Variabel Linguistik .....	9
2.4 Operasi Dasar Himpunan Fuzzy .....	10
2.5 Pengatur Logika Fuzzy.....	11
2.5.1 Fuzzifikasi .....	13

2.5.2	Basis Pengetahuan .....	14
2.5.2.1	Basis Data .....	14
2.5.2.2	Basis Kaidah .....	17
2.5.3	Logika Pengambilan Keputusan .....	22
2.5.3.1	Aturan Kontrol Fuzzy .....	23
2.5.3.2	Fungsi Implikasi Fuzzy .....	23
2.5.3.3	Mekanisme Inferensi .....	25
2.5.4	Defuzzifikasi .....	26
BAB III	PEMODELAN SISTEM DENGAN LOGIKA FUZZY .....	29
3.1	Frekuensi pada Sistem Tenaga .....	29
3.2	Turbin dan Sistem Pengendaliannya .....	32
3.3	Model Beban .....	33
3.4	Desain Pengatur Logika Fuzzy .....	35
3.4.1	Penentuan Variabel Masukan dan Keluaran .....	36
3.4.2	Penyusunan Basis Data .....	37
3.4.3	Penyusunan Aturan Dasar .....	40
3.4.4	Logika Pengambilan Keputusan .....	43
3.4.5	Defuzzifikasi .....	44
3.5	Pembentukan Model Sistem Pembangkit Listrik .....	45
BAB IV	STUDI SIMULASI DAN ANALISIS .....	49
4.1	Parameter-parameter Pengatur .....	49
4.2	Diagram Alir Program Simulasi .....	50
4.3	Data PLTA Saguling .....	53
4.4	Simulasi dan Analisis .....	53
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN .....	61
5.1	Kesimpulan .....	61
5.2	Saran .....	62

DAFTAR PUSTAKA .....	63
LAMPIRAN.....	65





## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Bentuk Fungsi Keanggotaan (a)segitiga, (b)eksponensial, (c)trapesium .....	9
2.2 Struktur Dasar PLF .....	12
2.3 Fungsi-fungsi Keanggotaan Uniform .....	17
2.4 Tanggapan Sistem Loop Tertutup .....	19
3.1 Turbin dan Sistem Pengendaliannya .....	32
3.2 Diagram Blok Sistem Pengaturan Frekuensi.....	35
3.3 Diagram Blok PLF.....	37
3.4 Penafsiran Grafis Tabel 3.1 .....	39
3.5 Model Sistem Mesin Tunggal untuk Pengaturan Frekuensi .....	45
4.1 Diagram Alir Program Simulasi.....	51
4.2 Sinyal Kontrol Fuzzy pada Penambahan Beban 5% .....	54
4.3 Perubahan Frekuensi Sistem pada Penambahan Beban 5%.....	54
4.4 Perubahan Torsi Sistem pada Penambahan Beban 5%.....	55
4.5 Perubahan Katup Sistem pada Penambahan Beban 5%.....	55
4.6 Sinyal Kontrol Fuzzy pada Pengurangan Beban 5%.....	56
4.7 Perubahan Frekuensi Sistem pada Pengurangan Beban 5% .....	56
4.8 Perubahan Torsi Sistem pada Pengurangan Beban 5%.....	57
4.9 Perubahan Katup Sistem pada Pengurangan Beban 5% .....	57
4.10 Sinyal Kontrol Fuzzy pada Penambahan Beban 2,5% .....	58
4.11 Perubahan Frekuensi Sistem pada Penambahan Beban 2,5%.....	58
4.12 Perubahan Torsi Sistem pada Penambahan Beban 2,5%.....	59
4.13 Perubahan Katup Sistem pada Penambahan Beban 2,5%.....	59

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>	<b>Halaman</b>
2.1 Kuantisasi dan Pendefinisian Numerik Himpunan Fuzzy .....	15
2.2 Prototipe Aturan Kontrol Linguistik dengan 3 Nilai .....	20
2.3 Penyempurnaan Aturan Kontrol dengan 3 Nilai .....	21
2.4 Prototipe Aturan Kontrol dengan 7 Nilai .....	21
2.5 Penyempurnaan Aturan Kontrol dengan 7 Nilai .....	22
2.6 Tabel Keputusan Aturan Kontrol Fuzzy MacVicar-Whelan .....	22
3.1 Pendefinisian Bentuk Fungsi Segitiga Seragam .....	38
3.2 Tabel Keputusan Aturan Kontrol Fuzzy MacVicar-Whelan .....	41
4.1 Tabel Keputusan Perubahan Sinyal Atur .....	50

## DAFTAR LAMBANG

$A$	: matrik variabel keadaan
$a$	: rataan
$B$	: matrik variabel masukan
$b$	: sebaran
$D$	: konstanta redaman mesin
$\Delta$	: perubahan
$\delta$	: sudut rotor (rad)
$f$	: frekuensi (Hz)
$H$	: konstanta inersia sistem
$K_{ga}$	: penguatan governor turbin air
$K_i$	: konstanta integrator
$K_p$	: penguatan sistem tenaga
$M$	: konstanta inersia mesin
$\mu$	: fungsi keanggotaan
$P_D$	: penambahan beban (gangguan)
$R$	: konstanta pengaturan turbin (rad/N.m.s)
$T_e$	: torsi elektrik (pu)
$T_{ga}$	: konstanta waktu governor air (detik)
$T_m$	: torsi mekanik (pu)
$T_p$	: konstanta waktu sistem
$T_s$	: waktu sampling
$T_t$	: konstanta waktu turbin air (detik)
$U$	: sinyal kontrol sisi turbin
$Y$	: ketinggian katup (m)

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 LATAR BELAKANG DAN PERUMUSAN MASALAH**

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik, dituntut adanya pelayanan yang baik terutama dari segi kontinuitas pelayanan dan kualitas yang terjamin. Tetapi suatu sistem tenaga listrik mempunyai banyak permasalahan dalam kinerjanya, terutama masalah kestabilan frekuensi dan tegangan merupakan hal yang vital.

Kestabilan pada sistem tenaga selalu terganggu oleh adanya gangguan baik yang bersifat transient ataupun dinamik. Gangguan yang bersifat transient disebabkan oleh gangguan besar seperti putusnya jaringan atau adanya hubung singkat. Sedangkan gangguan dinamik disebabkan oleh perubahan beban yang kecil.

Kestabilan dinamik sistem adalah kemampuan sistem untuk menuju pada keadaan yang stabil setelah mengalami perubahan beban yang memungkinkan mesin terus bergerak secara sinkron. Kestabilan ini dapat dicapai melalui kendali pada sisi governor untuk pengaturan kecepatan putar/frekuensi.

Usaha-usaha untuk memperbaiki kinerja dinamik sistem yang dilakukan dengan pengendalian frekuensi tersebut dilakukan dengan memanfaatkan konsep logika fuzzy. Logika fuzzy ini menggunakan basis pengetahuan dan ungkapan-ungkapan linguistik untuk merepresentasikan cara kerja operator atau suatu alat.



Dalam perancangan sistem pengaturan baik yang konvensional maupun modern diperlukan pendekatan matematis terhadap plantnya. Aturan-aturan kontrolnya diturunkan dari model matematis yang menyatakan hubungan antara masukan dan keluaran plant. Untuk proses yang kompleks, kita akan sulit menentukan persamaan matematisnya. Padahal operator manusia yang berbekal pengetahuan, pengalaman dan kemampuan belajarnya dapat mengatur proses-proses tersebut secara manual tanpa memahami model matematisnya. Dalam mengatur proses tersebut, operator mengungkapkan besaran-besaran secara kualitatif dan pengambilan keputusan terhadap proses terjadi secara kualitatif juga. Jadi operator bekerja menggunakan informasi yang ditafsirkan secara kualitatif yang bersifat tidak tentu atau tidak tepat.

Pengatur Logika Fuzzy menggunakan ungkapan linguistik yang dapat merepresentasikan cara kerja operator. Kemampuan ini didasari oleh teori himpunan fuzzy yang konsepnya dikemukakan kali pertama oleh L.A. Zadeh pada tahun 1965. Aturan kontrol pada logika fuzzy adalah himpunan aturan-aturan kontrol linguistik yang diturunkan berdasarkan keadaan suatu proses dan pengalaman operator. Dengan kata lain, pengatur logika fuzzy merupakan suatu pengatur yang pada prinsipnya mengubah strategi kontrol linguistik ke dalam strategi kontrol otomatis.

Penerapan konsep logika fuzzy ini didasarkan pada perubahan output yang terjadi sehingga sistem mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan dan dapat memberikan kinerja yang memenuhi kriteria.

## **1.2 TUJUAN TUGAS AKHIR**

Tujuan tugas akhir ini dititikberatkan pada perancangan Pengatur Logika Fuzzy (PLF) yang akan digunakan sebagai pengendali governor. Perancangan PLF dilakukan dengan menggunakan metode yang umum digunakan dan telah terbukti baik kinerjanya. Aturan dasar PLF diturunkan berdasarkan pengenalan terhadap obyek atur dan perilaku pengaturannya. Hasil perancangan diterapkan pada plant dengan cara simulasi.

## **1.3 PEMBATAHAN MASALAH**

Model sistem tenaga listrik yang dibahas adalah model generator sinkron (mesin tunggal) yang terhubung dengan bus infinit. Sistem dianggap dalam keadaan stabil dengan beban yang bersifat statis. Perubahan beban yang kecil (dinamik) pada sistem tenaga listrik yang invarian waktu. Obyek yang dipelajari adalah mesin tunggal dengan penggerak turbin air pada PLTA Saguling.

## **1.4 SISTEMATIKA PEMBAHASAN**

Sistematika pembahasan pada perancangan pengatur logika fuzzy dalam buku tugas akhir ini tersusun sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan, berisi latar belakang pemilihan perancangan dan perumusan masalah, tujuan tugas akhir, pembatasan masalah, sistematika pembahasan serta tujuan dan relevansi pembuatan tugas akhir.

Bab II Pengatur Logika Fuzzy, membahas konsep pengatur logika fuzzy yang dimulai dari konsep himpunan fuzzy, fungsi keanggotaan, variabel linguistik, operasi dasar himpunan fuzzy dan pengatur logika fuzzy. Pada bagian pengatur logika fuzzy diuraikan teori struktur dasar PLF, fuzzifikasi, basis data, aturan dasar, logika pengambilan keputusan dan defuzzifikasi.

Bab III Pemodelan Sistem dengan Logika Fuzzy, membahas mengenai pemodelan dinamik pada sistem tenaga listrik PLTA Saguling yang akan dijadikan plant yang meliputi model turbin air dan pengendalinya, model beban, governor dan yang menjadi pokok permasalahan pada tugas akhir ini membahas mengenai metode perancangan pengatur logika fuzzy pada governor di PLTA Saguling. Karena akan dilakukan simulasi maka akan dibuat persamaan matematis plant. Perancangan pengatur logika fuzzy menggunakan prosedur yang telah diuraikan pada bab kedua.

Bab IV Simulasi dan Analisis, membahas parameter-parameter pengatur, diagram atur, simulasi dan hasil simulasinya.

Bab V Kesimpulan dan Saran, merupakan bab penutup yang berisi kesimpulan tugas akhir dan saran mengenai kemungkinan pengembangan perancangan yang telah dilakukan.

## **1.5 TUJUAN DAN RELEVANSI**

Dari studi ini diharapkan dapat diperoleh manfaat berupa penerapan ilmu yang telah diperoleh selama masa perkuliahan dan juga memberikan alternatif dalam perbaikan kinerja sistem tenaga listrik dalam peredaman osilasi frekuensi di PLTA Saguling dengan menggunakan pengatur logika fuzzy. Juga dengan tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi perkembangan sistem kelistrikan di masa yang akan datang.



## **BAB II**

### **PENGATUR LOGIKA FUZZY**

Manusia mengenal obyek dengan memberikan klasifikasi secara kualitatif seperti panjang, pendek, besar, kecil dan sebagainya yang termasuk terminologi linguistik. Sifat kebenaran yang dikandungnya samar karena batasan antara definisi yang satu dengan yang lain tidak tegas. Kebenaran yang demikian disebut dengan kebenaran fuzzy.

Fuzzy secara leksikal mengandung arti samar, tidak jelas atau kabur. Dengan kata lain untuk menentukan fenomena-fenomena di alam nyata yang mengandung sifat serba tidak pasti atau samar kita tentukan aturan yang samar-samar juga. Pencetus konsep teori fuzzy adalah Prof. L.A. Zadeh dari Universitas California di Berkeley yang berupa teori himpunan fuzzy (fuzzy set). Konsep himpunan fuzzy ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan metode yang merepresentasikan dan menganalisa fenomena-fenomena di alam nyata yang tidak pasti ditinjau dari cara berpikir manusia terhadap fenomena-fenomena itu. Logika manusia dalam memandang suatu fenomena tidak hanya terdiri dari nilai benar dan salah atau nol dan satu, tetapi juga menggunakan penggolongan-penggolongan dengan batasan yang samar.

Konsep teori himpunan fuzzy didasarkan pada pengelompokan elemen-elemen ke dalam kelas-kelas yang mempunyai batas yang samar. Kelompok-kelompok inilah yang disebut himpunan fuzzy.

## 2.1 HIMPUNAN FUZZY

Himpunan klasik (crisp) didefinisikan sebagai kumpulan elemen atau obyek,  $u \in X$ , dengan  $X$  sebagai semesta pembicaraan. Dengan mendefinisikan fungsi keanggotaan (fungsi karakteristik) untuk suatu himpunan dengan memberikan harga 1 bagi anggota dan 0 bagi bukan anggota, suatu himpunan klasik dapat direpresentasikan oleh pasangan harga  $(u,0)$  dan  $(u,1)$ . Fungsi karakteristik  $\mu_A(u)$  dapat digunakan untuk mewakili apakah suatu obyek  $u$  ( $u \in X$ ) milik  $A$  atau bukan.

$$\mu_A : X \rightarrow \{0,1\}$$

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 & \text{jika } u \in A \\ 0 & \text{jika } u \notin A \end{cases}$$

Suatu himpunan fuzzy  $F$  dalam semesta pembicaraan  $X = \{u\}$  didefinisikan oleh pasangan

$$F = \{(u, \mu_F(u)) \mid u \in F\} \quad (2.1)$$

Jika  $u$  diskrit dengan  $n$  elemen,  $F$  dapat dinyatakan sebagai

$$F = \mu_1(u)/u_1 + \mu_2(u)/u_2 + \dots + \mu_n(u)/u_n$$

$$F = \sum_{i=1}^n \mu_F(u_i)/u_i \quad (2.2)$$

Jika  $u$  kontinyu,  $F$  dapat dinyatakan sebagai

$$F = \int_u \mu_F(u)/u \quad (2.3)$$

Tanda garis miring pada rumus di atas bukan menyatakan suatu pembagian, melainkan nilai keanggotaan tersebut relatif terhadap harga  $u$  yang bersangkutan.

Dalam himpunan fuzzy  $F$ ,  $u$  disebut penyokong  $F$ . Untuk elemen  $u$  di mana  $\mu_F(u) = 0,5$  disebut titik silang (cross over). Himpunan fuzzy yang mempunyai penyokong tunggal dengan  $\mu_F(u) = 1,0$  disebut fuzzy tunggal (fuzzy singleton).

## 2.2 FUNGSI KEANGGOTAAN HIMPUNAN FUZZY

Untuk menyatakan fungsi keanggotaan dalam pendefinisian himpunan fuzzy tergantung pada bentuk yang akan digunakan. Secara umum terdapat dua metode yaitu pendefinisian secara numerik dan bentuk fungsi. Pendefinisian secara numerik diterapkan atas himpunan dengan penyokong diskrit, sedangkan pendefinisian bentuk fungsi diterapkan pada penyokong kontinyu.

### 2.2.1 Definisi Bentuk Numerik

Fungsi keanggotaan yang didefinisikan secara numerik menggunakan penyokong diskrit. Contoh

$$X = 8, 9, 10, 11, 12$$

$$\mu_F(x) = 0,5, 0,8, 1,0, 0,8, 0,5$$

maka himpunan fuzzy yang didefinisikan untuk himpunan elemen  $x$  di atas adalah

$$F = 0,5/8, 0,8/9, 1,0/10, 0,8/11, 0,5/12$$

### 2.2.2 Definisi Bentuk Fungsi

Fungsi keanggotaan yang didefinisikan dalam bentuk fungsi digunakan pada pendukung kontinyu. Ada beberapa fungsi yang dapat digunakan dalam himpunan fuzzy, tetapi yang sering digunakan adalah :

- Fungsi segitiga

$$\mu_F(x) = 1 - \sqrt{\frac{(x-a)^2}{b^2}} \quad (2.4)$$

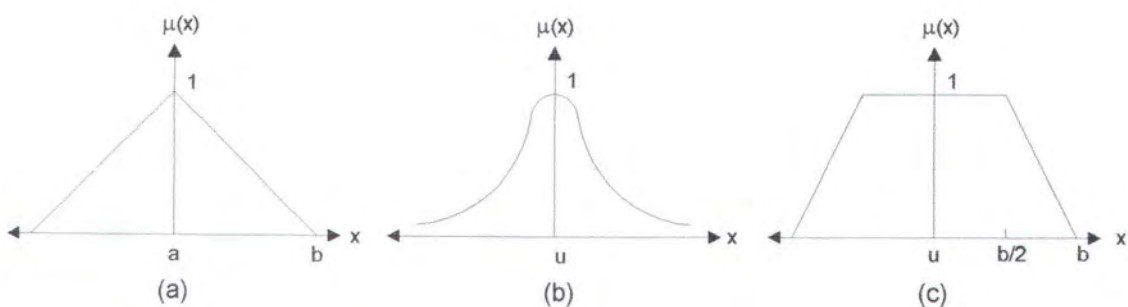
- Fungsi eksponensial

$$\mu_F(x) = \exp\left(-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.5)$$

- Fungsi trapesium

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 1; 0 \leq (x-a) \leq \frac{b}{2} \\ 2 - 2\frac{\sqrt{(x-a)^2}}{b}; \frac{b}{2} < (x-a) \leq b \end{cases} \quad (2.6)$$

Gambar bentuk fungsi di atas ditunjukkan oleh gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Bentuk fungsi keanggotaan (a)segitiga, (b)eksponensial, (c)trapesium

## 2.3 VARIABEL LINGUISTIK

Pendekatan himpunan fuzzy untuk merepresentasikan cara berpikir manusia memerlukan variabel linguistik sebagai ganti dari variabel numerik yang biasa digunakan dalam pendekatan kuantitatif. Variabel linguistik ini berupa ungkapan-ungkapan yang bersifat kualitatif dan berfungsi untuk menyatakan



himpunan fuzzy. Dalam bentuk sederhana, variabel linguistik dapat dinyatakan dengan pasangan  $(u, T(u), X)$  dengan  $u$  sebagai nama variabel,  $T(u)$  adalah istilah yang menyatakan himpunan harga linguistik  $u$  yang harganya adalah bilangan fuzzy yang didefinisikan atas semesta  $X$ .

## 2.4 OPERASI DASAR HIMPUNAN FUZZY

Misal  $A$  dan  $B$  adalah himpunan fuzzy dalam semesta  $X$  dengan fungsi keanggotaan  $\mu_A(x)$  dan  $\mu_B(x)$ . Dalam operasinya ada beberapa operasi dasar himpunan fuzzy yang sering digunakan yaitu :

1. **Irisan**, fungsi keanggotaan  $\mu_C(x)$  dari irisan  $C = A \cap B$  didefinisikan sebagai

$$\mu_C(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.7)$$

2. **Gabungan**, fungsi keanggotaan  $\mu_D(x)$  dari gabungan  $D = A \cup B$  didefinisikan sebagai

$$\mu_D(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.8)$$

3. **Komplemen**, fungsi keanggotaan komplemen  $A$ ,  $\mu_{\bar{A}}(x)$  didefinisikan sebagai

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.9)$$

4. **Produk Kartesian**, jika  $A_1, A_2, \dots, A_n$  adalah himpunan fuzzy dalam ruang produk  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , maka produk kartesian  $A_1, A_2, \dots, A_n$  adalah himpunan fuzzy dalam ruang produk  $X_1, X_2, \dots, X_n$  dengan fungsi keanggotaan yang didefinisikan sebagai

$$\mu_{A_1 \times A_1 \times \dots \times A_1}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min\{\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_1}(x_1)\} \text{ atau}$$

$$\mu_{A_1 \times A_1 \times \dots \times A_1}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \mu_{A_1}(x_1) \cdot \mu_{A_1}(x_1) \cdot \dots \cdot \mu_{A_1}(x_1) \quad (2.10)$$

5. **Relasi Fuzzy** (Fuzzy Relation), suatu  $n$  relasi fuzzy adalah himpunan fuzzy dalam  $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$  dan fungsi keanggotaannya dinyatakan sebagai

$$\mu_{X_1 \times \dots \times X_n} = \{(x_1, \dots, x_n) \mid \mu(x_1, \dots, x_n) \mid (x_1, \dots, x_n) \in X_1 \times \dots \times X_n\} \quad (2.11)$$

6. **Komposisi Sup-Star** (Sup-Star Composition), jika  $R$  dan  $S$  merupakan relasi fuzzy dalam  $X \times Y$  dan  $Y \times Z$ , maka komposisi  $R$  dan  $S$  adalah relasi fuzzy yang dinyatakan dengan  $R \circ S$  dan didefinisikan sebagai

$$R \circ S = [(x, z), \sup \mu_R(x, y) * \mu_S(y, z)], x \in X, y \in Y, z \in Z \quad (2.12)$$

7. **Aturan Inferensi Komposisi Sup-Star** (Sup-Star Compositional Rule of Inference), jika  $R$  adalah relasi fuzzy dalam  $X \times Y$  dan  $x$  adalah himpunan fuzzy dalam  $X$ , maka aturan inferensi komposisi sup-star menyatakan bahwa himpunan fuzzy  $y$  dalam  $Y$  diberikan oleh

$$y = x \circ R \quad (2.13)$$

dengan  $x \circ R$  adalah komposisi sup-star  $x$  dan  $R$ .

## 2.5 PENGATUR LOGIKA FUZZY

Pada pengatur logika fuzzy, pengendalian dilakukan oleh sistem pakar berbasis logika fuzzy, suatu model berpikir logik yang mirip dengan cara manusia mengambil keputusan. Pada dasarnya pengatur logika fuzzy merupakan metode

pengaturan yang mengemulasikan cara berpikir manusia dengan melibatkan ketidakpastian pada sistem-sistem fisis. Pengatur logika fuzzy membuat keputusan sebagai sinyal atur berdasarkan pada masukan dan keluaran yang telah terjadi sebelumnya yang berbentuk variabel linguistik, dengan menggunakan aturan yang dijabarkan secara umum dalam bentuk :

*If e and de, then u*

dengan :

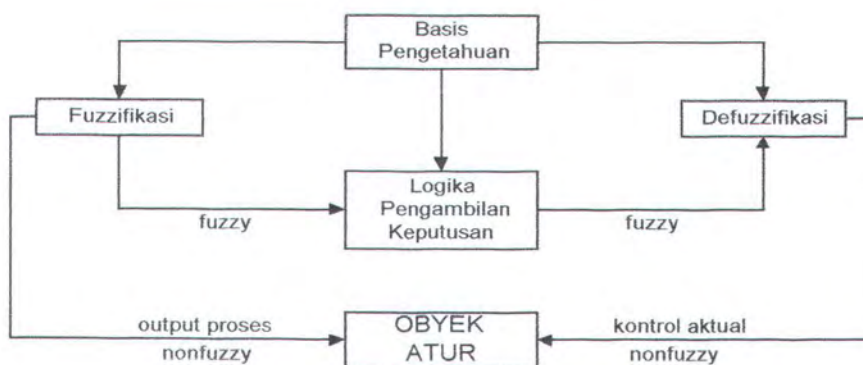
$e$  : kesalahan output sistem

$de$  : perubahan kesalahan output sistem

$u$  : sinyal atur

Aturan logika pada strategi kontrol dapat dibuat dengan bebas, asalkan aturan-aturan tersebut menjamin konsekuensi logis dari hubungan antar variabel yang terlibat. Error ( $e$ ) dan perubahan error ( $de$ ) obyek atur/sistem merupakan masukan bagi PLF dan sinyal atur ( $u$ ) PLF merupakan masukan bagi sistem/plant.

Secara umum PLF mempunyai empat bagian pokok seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Struktur dasar PLF [4]



Keempat bagian tersebut mempunyai fungsi sebagai berikut :

1. Fuzzifier berfungsi untuk mentransformasikan sinyal masukan yang bersifat crisp (nonfuzzy) ke dalam himpunan fuzzy dengan menggunakan operator fuzzifier.
2. Basis Pengetahuan berisi basis data dan aturan dasar yang mendefinisikan himpunan fuzzy atas daerah-daerah masukan dan keluaran serta menyusunnya dalam perangkat aturan kontrol.
3. Logika Pengambil Keputusan adalah inti PLF yang mempunyai kemampuan menirukan proses pengambilan keputusan manusia dalam mengambil keputusan. Aksi atur fuzzy disimpulkan dengan menggunakan implikasi fuzzy dan mekanisme inferensi fuzzy.
4. Defuzzifier berfungsi untuk mentransformasikan kesimpulan tentang aksi atur yang bersifat fuzzy menjadi sinyal sebenarnya yang bersifat crisp dengan menggunakan operator defuzzifier.

### 2.5.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi adalah pemetaan nilai masukan nonfuzzy ke dalam bentuk fuzzy. Hal ini disebabkan oleh besaran masukan yang diperoleh dari plant akan selalu berupa crisp yang bersifat pasti dan kuantitatif, sedangkan pengolahan data dalam PLF didasarkan pada teori himpunan fuzzy yang menggunakan variabel linguistik yang bersifat fuzzy. Sehingga pada tahap awal PLF diperlukan adanya





fuzzifikasi yang dilakukan oleh fuzzifier. Secara umum pemetaan ini dinyatakan dengan :

$$x = \text{fuzzifier}(x_0) \quad (2.14)$$

$x_0$  adalah masukan crisp,  $x$  adalah himpunan fuzzy dan fuzzifier adalah operator fuzzifikasi.

### 2.5.2 Basis Pengetahuan

Basis pengetahuan dalam PLF memuat pengetahuan spesifik dari domain masalah yang akan diselesaikan. Bagian ini terdiri dari :

#### 2.5.2.1 Basis Data

Mendefinisikan kaidah kendali fuzzy dalam bentuk linguistik dan manipulasi data fuzzy pada PLF. Kaidah ini didefinisikan berdasarkan pengalaman dan pengetahuan kerekayasaan, dengan memperhatikan aspek-aspek penting berikut :

- Kuantisasi dan Normalisasi

Kuantisasi berarti mendiskritkan semesta pembicaraan yang kontinyu ke dalam sejumlah segmen-segmen tertentu yang disebut level kuantisasi. Pemberian label level-level ini membentuk pendukung himpunan fuzzy secara berhingga atau semesta pembicaraan baru yang bersifat diskrit. Prosedur ini diperlukan bila pendefinisian fungsi keanggotaannya dinyatakan secara numerik. Pendefinisian ini biasanya dinyatakan dalam bentuk tabulasi. Tabel 2.1 menunjukkan contoh pendefinisian secara numerik dengan pembagian ruang sebanyak tujuh variabel linguistik yaitu negatif besar (NB), negatif

sedang (NS), negatif kecil (NK), nol (NL), positif kecil (PK), positif sedang (PS), dan positif besar (PB).

**Tabel 2.1** Kuantisasi dan Pendefinisian Numerik Himpunan Fuzzy [4]

No.	Range	NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB
-6	$x_0 < -3,2$	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-5	$-3,2 < x_0 < -1,6$	0,7	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-4	$-1,6 < x_0 < -0,8$	0,3	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
-3	$-0,8 < x_0 < -0,4$	0,0	0,7	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
-2	$-0,4 < x_0 < -0,2$	0,0	0,3	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0
-1	$-0,2 < x_0 < -0,1$	0,0	0,0	0,7	0,7	0,0	0,0	0,0
0	$-0,1 < x_0 < +0,1$	0,0	0,0	0,3	1,0	0,3	0,0	0,0
1	$+0,1 < x_0 < +0,2$	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	0,0	0,0
2	$+0,2 < x_0 < +0,4$	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	0,3	0,0
3	$+0,4 < x_0 < +0,8$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	0,0
4	$+0,8 < x_0 < +1,6$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	0,3
5	$+1,6 < x_0 < +3,2$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7
6	$+3,2 < x_0$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0

Pada tabel tersebut kuantisasi dilakukan atas daerah kontinyu dengan jumlah 13 level kuantisasi, sehingga diperoleh 13 penyokong yang membentuk semesta pembicaraan baru.

Pemilihan jumlah level kuantisasi mempengaruhi kepekaan PLF terhadap masukan dan kehalusan aksi atur pada keluaran. Semakin banyak level kuantisasi yang diterapkan pada daerah masukan dan keluaran maka PLF akan semakin peka dan semakin halus aksi aturnya.

Normalisasi diperlukan bila diinginkan semesta pembicaraan yang terbatas pada jangkauan tertentu, misal dari -1 hingga 1. Jadi normalisasi merupakan pemetaan semesta pembicaraan masukan ke semesta pembicaraan baru yang

terbatas. Skala pemetaan bisa seragam (uniform) atau tidak seragam (non-uniform) tergantung kebutuhan perancangannya.

- **Pembagian Ruang Masukan dan Keluaran**

Pernyataan dari suatu kaidah atur fuzzy membentuk ruang masukan dan kesimpulan membentuk ruang keluaran dari semesta pembicaraan. Ruang masukan dan keluaran selanjutnya dibagi menjadi segmen-segmen untuk menentukan jumlah himpunan fuzzy dan kaidah atur yang dapat disusun dan juga untuk menentukan kehalusan pengatur PLF.

- **Pemilihan Fungsi Keanggotaan**

Fungsi keanggotaan dapat dipilih secara bebas dengan menentukan secara sembarang nilai keanggotaannya. Tetapi pada dasarnya penentuan ini harus tetap dapat menggambarkan karakteristik masing-masing himpunan fuzzy.

Pada pendefinisian secara numerik tingkat keanggotaan penyokong dalam himpunan fuzzy dinyatakan dalam bentuk tabulasi seperti yang dicontohkan pada tabel 2.1. Pembagian ruang dilakukan dengan tujuh nilai linguistik himpunan fuzzy, sedangkan fungsi keanggotaannya dinyatakan

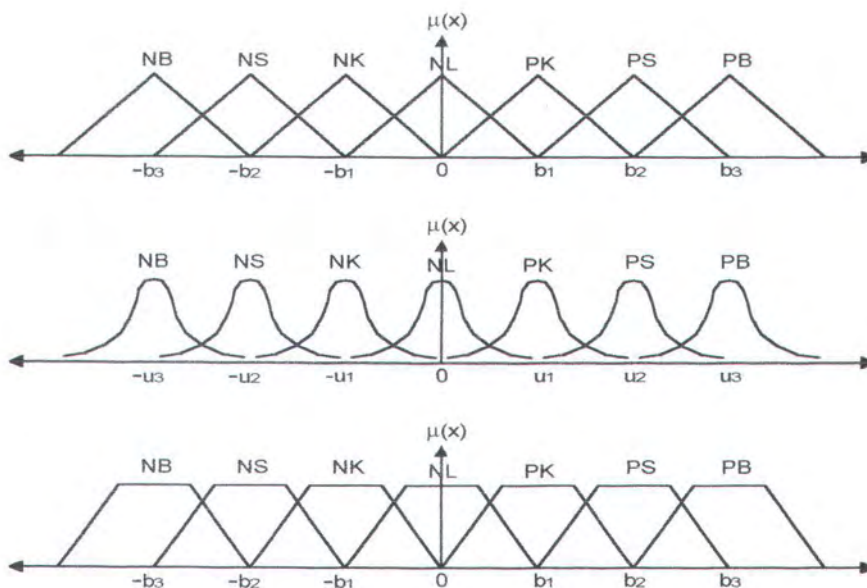
$$\mu(x) = \sum \mu(x_i)/x_i$$

dengan  $\mu(x) = \{0,3; 0,7; 1,0; 0,7; 0,3\}$

Pada pendefinisian secara fungsional tidak diperlukan pemberian nomor level kuantisasi karena dalam hal ini tidak diperlukan pendukung yang diskrit. Pembagian ruangnya biasanya cukup dengan menentukan titik sumbu simetri dan sebaran (jangkauan) fungsi yang digunakan. Fungsi ini mudah diadaptasi terhadap



semesta pembicaraan dengan cara mengatur parameter ratahan yang menentukan titik kerja dan parameter sebaran yang menentukan jangkauan kerja. Fungsi yang sering digunakan adalah fungsi eksponen, fungsi segitiga dan fungsi trapesium seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Ketiga macam fungsi ini dipilih karena mudah dimanipulasi secara matematis. Parameter ratahan ( $u$  dan  $a$ ) dan parameter sebaran dapat dipilih secara bebas, tetapi tentunya dengan pertimbangan perancangan yang layak. Dalam hal parameter sebaran seragam biasanya dipilih sedemikian rupa sehingga titik silang (*cross over*) terletak di tengah-tengah dua ratahan himpunan yang bersebelahan. Contoh penggunaan parameter ratahan seragam ditunjukkan pada gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Fungsi-fungsi keanggotaan uniform

### 2.5.2.2 Basis Kaidah

Basis kaidah adalah bagian yang menggambarkan aksi dinamika suatu plant terhadap input yang dikarakterisasikan oleh sekumpulan pernyataan



linguistik dan berbasis pengetahuan dari seseorang yang sudah ahli atau pengetahuan kerekayasaan. Pernyataan tersebut diimplementasikan dengan suatu pernyataan bersyarat dalam logika fuzzy.

Dalam pembentukan basis kaidah perlu diperhatikan aspek berikut :

#### 1. Pemilihan Variabel Masukan dan Keluaran

Pemilihan variabel ini memerlukan pemahaman tentang perilaku plant dan pengaturannya. Dalam hal ini pengetahuan dan pengalaman kerekayasaan memainkan peranan yang sangat penting. Secara umum, sebagaimana pengatur konvensional, error dan perubahan error plant tetap menjadi acuan utama bagi aturan kontrol PLF untuk menghasilkan sinyal atur.

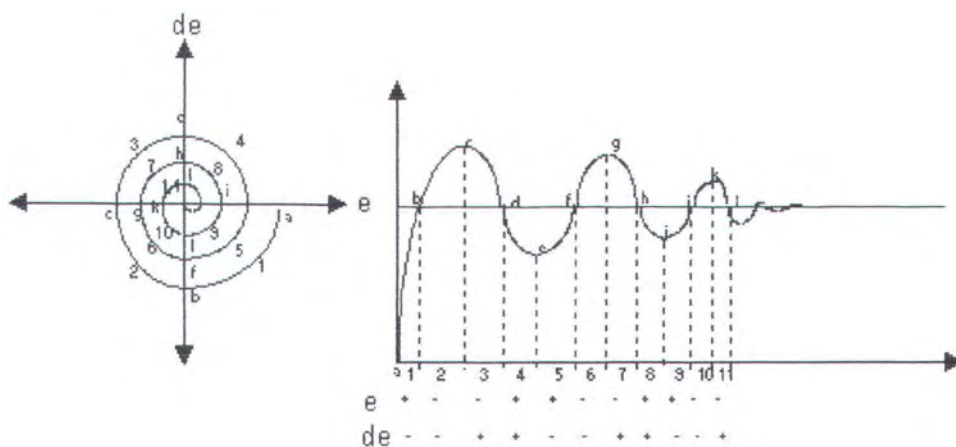
#### 2. Penurunan Aturan Kontrol Fuzzy

Salah satu cara menentukan aturan kontrol fuzzy adalah dengan mengumpulkan aturan-aturan kontrol fuzzy yang dibentuk dari analisis perilaku obyek atur secara heuristik. Aturan kontrol diturunkan dengan jalan mengoreksi simpangan keluaran plant menuju keadaan yang diinginkan. Hasil yang diperoleh berupa prototipe aturan kontrol secara garis besar sehingga masih perlu disempurnakan.

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk menyempurnakan prototipe aturan kontrol itu. King dan Mamdani mengusulkan metode penyempurnaan aturan kontrol dengan cara yang disebut pemetaan skala (Scale Mappings). Prinsipnya adalah menentukan sinyal atur sedemikian rupa sehingga trayektori sistem loop tertutup berakhir pada keadaan yang diinginkan. Dalam hal ini pengetahuan tentang perilaku plant, seperti lewatan,

waktu naik dan sebagainya, serta intuisi tentang perilaku sistem tertutup diperlukan.

Gambar 2.4 menunjukkan tanggapan plant loop tertutup terhadap variabel masukan plant. Terdapat dua variabel masukan PLF yang dapat digunakan yaitu error ( $e$ ) dan perubahan error ( $de$ ). Untuk memperjelas trayektori dapat digunakan grafik yang menyatakan hubungan antara error ( $e$ ) dan perubahan error ( $de$ ), sedangkan variabel keluaran PLF berupa perubahan sinyal atur ( $du$ ) dan sinyal atur ( $u$ ).



**Gambar 2.4** Tanggapan Sistem Loop Tertutup [4]

Pada penurunan prototipe ini, pembagian ruang masukan berjumlah tiga, yang berarti ada tiga nilai linguistik yaitu positif (P), negatif (N), dan nol (NL). Peninjauan kualitatif per titik pada grafik memberikan penalaran yang menghasilkan prototipe aturan kontrol pada tabel 2.2.

**Tabel 2.2** *Prototipe aturan kontrol linguistik dengan 3 nilai [4]*

Aturan No	<i>e</i>	<i>de</i>	<i>u</i>	Titik Referensi
1	P	NL	P	a, e, i
2	NL	N	N	b, f, j
3	N	NL	N	c, g, k
4	NL	P	P	d, h, l
5	NL	NL	NL	set point

### 3. Justifikasi kaidah pengatur fuzzy

Justifikasi ini diperlukan sebab kaidah atur di atas masih merupakan bentuk dasar dan belum mencakup pada kondisi peralihan. Pada justifikasi dilakukan melalui pendekatan : metode heuristik. Metode heuristik dibangun berdasar hasil analisa kelakuan dinamika proses yang dikendalikan berdasarkan pengetahuan kualitatif. Kaidah atur dibentuk sedemikian rupa sehingga simpangan dari keadaan yang diinginkan dan waktu mencapai keadaan yang diinginkan dapat dikoreksi terhadap kinerja sistem serta tujuan pengaturan dapat dicapai. Hal ini memberikan penyempurnaan aturan kontrol seperti pada tabel 2.3.

**Tabel 2.3** *Penyempurnaan aturan kontrol dengan 3 nilai [4]*

Aturan No.	<i>e</i>	<i>de</i>	<i>u</i>	Titik Referensi
6	P	N	P	1 (rise time), 5
7	N	N	N	2 (over shoot), 6
8	N	P	N	3, 7
9	P	P	P	4, 8
10	P	N	NL	9
11	N	P	NL	10

Kinerja yang lebih baik dapat diperoleh dengan pembagian ruang yang lebih banyak, misalnya tujuh nilai yaitu NB, NS, NK, NL, PK, PS dan PB.



Pembagian ruang dengan tujuh nilai sering digunakan pada perancangan PLF, karena pembagian ruang tersebut sudah dapat mewakili ruang keseluruhan dan didapat hasil yang baik. Prototipe dan penyempurnaan berturut-turut ditunjukkan oleh tabel 2.4 dan tabel 2.5. Secara langsung pembagian ruang masukan mempengaruhi jumlah aturan kontrol yang dihasilkan. Pada sistem MISO, jumlah aturan kontrol yang dihasilkan adalah  $7 \times 7$  aturan kontrol.

**Tabel 2.4** *Prototipe aturan kontrol dengan 7 nilai [4]*

Aturan No.	<i>e</i>	<i>é</i>	<i>u</i>	Titik Referensi
1	PB	NL	PB	a
2	PS	NL	PS	e
3	PK	NL	PK	i
4	NL	NB	NB	b
5	NL	NS	NS	f
6	NL	NK	NK	j
7	NB	NL	NB	c
8	NS	NL	NS	g
9	NK	NL	NK	k
10	NL	PB	PB	d
11	NL	PS	PS	h
12	NL	PK	PK	l
13	NL	NL	NL	set point

**Tabel 2.5** *Penyempurnaan aturan kontrol dengan 7 nilai [4]*

Aturan No.	<i>e</i>	<i>de</i>	<i>u</i>	Titik Referensi
14	PB	NK	PS	1
15	PK	NB	NS	1
16	NB	PS	NS	3
17	NS	PB	PS	3
18	PK	NK	NL	9
19	NK	PK	NL	11



Hasil yang didapat dari penyempurnaan aturan kontrol tersebut dapat dibuat aturan kontrol yang lengkap untuk sistem MISO. MacVicar-Whelan yang meneliti masalah penyempurnaan aturan kontrol ini menemukan pola umum hubungan antara  $e$ ,  $de$  dan  $u$  atau  $du$ . Penurunan secara lengkap aturan kontrol ini memberikan tabel keputusan sinyal atur yang disebut Tabel Keputusan MacVicar-Whelan. Tabel ini memberikan jumlah aturan kontrol secara maksimum. Pola ini berlaku bagi PLF yang menggunakan masukan error dan perubahan error. Tabel 2.6 menunjukkan aturan kontrol fuzzy secara lengkap.

**Tabel 2.6** *Tabel Keputusan Aturan Kontrol Fuzzy MacVicar-Whelan [14]*

		PERUBAHAN ERROR ( $de$ )						
		NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB
E R R O R ( $e$ )	NB	NB	NB	NB	NB	NS	NK	NK
	NS	NB	NB	NB	NS	NK	NL	NL
	NK	NB	NB	NS	NK	NL	PK	PK
	NL	NB	NS	NK	NL	PK	PS	PS
	PK	NS	NK	NL	PK	PS	PB	PB
	PS	NK	PL	PK	PS	PB	PB	PB
	PB	NL	PK	PS	PB	PB	PB	PB

**2.5.3 Logika Pengambilan Keputusan**

Inti persoalan pengaturan fuzzy terletak pada logika pengambilan keputusannya yang meniru proses pengambilan keputusan pada manusia. Pengambilan keputusan ini merupakan interpretasi dari aturan-aturan yang ada pada basis kaidah dengan mengacu pada operasi implikasi himpunan-himpunan fuzzy.

### 2.5.3.1 Aturan Kontrol Fuzzy

Bentuk umum aturan kontrol fuzzy adalah pernyataan jika-maka (*if-then*), yang meniru cara kerja operator yang secara sadar atau tidak menggunakan aturan kontrol yang berupa hubungan jika-maka dalam mengambil keputusan dan pernyataan lengkapnya adalah :

$$\text{Jika (masukan}_i\text{) maka (keluaran}_j\text{), } i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

Masukan dan keluaran merupakan himpunan fuzzy yang dinyatakan dengan variabel linguistik. Masukan merupakan keadaan obyek atur dan keluaran merupakan tindakan yang harus dilakukan terhadap obyek atur sehubungan dengan keadaan masukan. Aturan kontrol di atas merupakan bentuk MIMO (multi input multi output). Untuk sistem MISO, keluaran hanya ada satu. Sistem yang akan dibahas adalah sistem MISO dengan dua masukan dan satu keluaran yang perangkat aturan kontrolnya berbentuk :

$R_1$  : Jika  $x$  adalah  $A_1$  dan  $y$  adalah  $B_1$  maka  $Z$  adalah  $C_1$

$R_2$  : Jika  $x$  adalah  $A_2$  dan  $y$  adalah  $B_2$  maka  $Z$  adalah  $C_2$

⋮ ⋮ ⋮ ⋮

$R_n$  : Jika  $x$  adalah  $A_n$  dan  $y$  adalah  $B_n$  maka  $Z$  adalah  $C_n$

$x$  dan  $y$  adalah variabel masukan dan  $z$  adalah variabel keluaran.  $A$ ,  $B$  dan  $C$  adalah nilai linguistik variabel  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  dalam semesta pembicaraan  $X$ ,  $Y$ , dan  $Z$ .

### 2.5.3.2 Fungsi Implikasi Fuzzy

Aturan kontrol pada dasarnya adalah relasi fuzzy yang dinyatakan sebagai suatu hubungan sebab akibat yang disebut implikasi fuzzy. Aturan kontrol fuzzy bila dinyatakan dengan implikasi fuzzy akan menjadi :



$$\begin{aligned}
\mu_{R_i}^{\Delta} &= \mu(A_i \text{ dan } B_i \rightarrow C_i)(x, y, z) \\
&= [\mu_{A_i}(x) \text{ dan } \mu_{B_i}(y)] \rightarrow \mu_{C_i}(z)
\end{aligned} \tag{2.16}$$

dengan  $A_i$  dan  $B_i$  adalah himpunan fuzzy  $A_i \times B_i$  dalam  $X \times Y$ ,  $R_i^{\Delta} = (A \text{ dan } B) \rightarrow C_i$  adalah implikasi fuzzy dalam  $X \times Y \times Z$  dan notasi  $\rightarrow$  merupakan fungsi implikasi fuzzy. Bentuk fungsi implikasi ini bersesuaian dengan aturan kontrol.

Fungsi implikasi dapat didefinisikan sebagai suatu relasi yang menunjukkan keterkaitan antara suatu kejadian sebab dengan kejadian akibat. Semakin cocok hasil pembuktian matematis (secara fuzzy) suatu fungsi implikasi dengan intuisi tentang keterkaitan kejadian di atas maka semakin baik implikasi tersebut.

Salah satu fungsi implikasi yang akan dipakai di sini adalah hasil penelitian Mamdani. Fungsi ini disebut fungsi implikasi aturan operasi-mini yang dinotasikan dengan  $R_c$  :

$$\begin{aligned}
R_c &= A \times B \\
&= \int_{X \times Y} \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) / (x, y)
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Untuk sistem MISO didapat :

$$\begin{aligned}
R_c &= (A \times B) \times C \\
&= \int_{X \times Y \times Z} \mu_{A \times B}(x, y) \wedge \mu_C(z) / (x, y, z)
\end{aligned} \tag{2.18}$$

dengan bentuk  $A \times B$  adalah produk kartesian masukan dalam  $X \times Y$ .



### 2.5.3.3 Mekanisme Inferensi

Untuk mengombinasikan aturan kontrol digunakan kata hubung yang secara umum berbentuk :

$$\begin{array}{ll}
 \text{masukan} & : x \text{ adalah } A' \text{ dan } y \text{ adalah } B' \\
 R_1 & : \text{jika } x \text{ adalah } A_1 \text{ dan } y \text{ adalah } B_1 \text{ maka } z \text{ adalah } C_1 \\
 \text{juga } R_2 & : \text{jika } x \text{ adalah } A_2 \text{ dan } y \text{ adalah } B_2 \text{ maka } z \text{ adalah } C_2 \\
 & \vdots \\
 & \vdots \\
 \text{juga } R_n & : \text{jika } x \text{ adalah } A_n \text{ dan } y \text{ adalah } B_n \text{ maka } z \text{ adalah } C_n \\
 \text{Kesimpulan} & : z \text{ adalah } C'
 \end{array} \quad (2.19)$$

Keseluruhan aturan kontrol ini harus dapat menghasilkan satu keluaran berupa kesimpulan yang dinyatakan dengan  $C'$ . Kesimpulan  $C'$  diperoleh dari mekanisme inferensi dengan komposisional sup-star yang didasarkan dari fungsi implikasi fuzzy dan kata hubung “*dan*” dan “*juga*”.

Ada beberapa lemma penting yang berhubungan dengan mekanisme inferensi. Lemma-lemma itu adalah :

$$\text{Lemma 1 : } (A', B') \circ \bigcup_{i=1}^n R_i = \bigcup_{i=1}^n (A', B') \circ R_i \quad (2.20)$$

dengan  $R_i$  adalah relasi aturan kontrol ke- $i$

Lemma 2 : untuk fungsi implikasi operasi-mini Mamdani diperoleh

$$1. (A', B')_o(A_i \text{ dan } B_i \rightarrow C_i) = [(A'_o(A_i \rightarrow C_i))] \cap [B'_o(B_i \rightarrow C_i)] \quad (2.21)$$

$$\text{jika } \mu_{A_i \times B_i} = \mu_{A_i} \wedge \mu_{B_i}$$

$$2. (A', B')_o(A_i \text{ dan } B_i \rightarrow C_i) = [(A'_o(A_i \rightarrow C_i))] \cdot [B'_o(B_i \rightarrow C_i)] \quad (2.22)$$



$$\text{jika } \mu_{A_i \times B_i} = \mu_{A_i} \cdot \mu_{B_i}$$

Lemma 3 : jika masukan berupa fuzzy tunggal  $A' = x_0$  dan  $B' = y_0$  diperoleh

$$1. R_c : \alpha_{\hat{z}_i} \wedge \mu_{C_i}(z), \quad \alpha_{\hat{z}_i} = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \quad (2.23)$$

$$2. R_c : \alpha_{\hat{z}_i} \wedge \mu_{C_i}(z), \quad \alpha_{\hat{z}_i} = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \quad (2.24)$$

Lemma 1 menyatakan bahwa keluaran yang disimpulkan dari semua perangkat aturan kontrol sama dengan gabungan semua keluaran tiap-tiap aturan kontrol. Sedang lemma dua dan tiga menguraikan penerapan fungsi implikasi operasi-mini Mamdani ( $R_c$ ) dengan menggunakan kedua jenis produk kartesian. Dari kedua lemma ini diperoleh hubungan sederhana antara masukan dan keluaran :

$$R_c : \mu_{C'} = \bigcup_{i=1}^n \alpha_i \wedge \mu_{C_i} \quad (2.25)$$

dengan faktor pembobot adalah besarnya kontribusi aturan ke-i untuk aksi kontrol fuzzy. Faktor pembobot dapat ditentukan dengan dua pilihan yaitu dengan operasi minimum ( $\alpha_{\hat{z}_i}$ ) dan produk aljabar ( $\alpha_{\hat{z}_i}$ ) dalam produk kartesian.

#### 2.5.4 DEFUZZIFIKASI

Defuzzifikasi adalah pemetaan ruang aksi kontrol fuzzy menjadi ruang aksi kontrol nonfuzzy (crisp). Secara garis besar strategi defuzzifikasi bertujuan untuk menghasilkan aksi atur yang nyata yang dapat merepresentasikan distribusi aksi atur masing-masing aturan kontrol.

Bentuk umum proses defuzzifikasi adalah :

$$z_0 = \text{defuzzifier}(z) \quad (2.26)$$

Ada beberapa metode defuzzifikasi yang dapat digunakan. Yang paling umum ada tiga macam yaitu kriteria max (The Criterion Max), titik tengah maksimum (The Mean of Maximum) dan metode titik pusat (The Center of Area).

### 1. Metoda Kriteria Max (MAX)

Kriteria Max menghasilkan titik di mana distribusi yang mungkin pada aksi kontrol bernilai maksimum.

### 2. Metoda Titik Tengah Maksimum (MOM)

Strategi MOM membangkitkan aksi kontrol dengan merepresentasikan nilai titik tengah semua aksi kontrol yang fungsi keanggotaannya maksimum.

Untuk kasus diskrit, aksi kontrolnya ditunjukkan sebagai :

$$z_o = \sum_{j=1}^I \frac{z_j}{I} \quad (2.27)$$

dengan  $z_j$  adalah nilai penyokong dengan fungsi keanggotaan bernilai maksimum dan  $I$  adalah banyaknya nilai penyokong.

### 3. Metoda Titik Pusat (COA)

Metoda ini paling sering dipergunakan. Strategi COA dibangkitkan dari pusat berat (the center of gravity) pada aksi kontrol. Dalam kasus diskrit aksi kontrol dinyatakan sebagai :

$$z_o = \frac{\sum_{j=1}^n u_z(w_j) \cdot w_j}{\sum_{j=1}^n u_z(w_j)} \quad (2.28)$$

dengan  $n$  adalah banyaknya level kuantisasi output.

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Braee dan Rutherford, L.I. Larkin dan C.C. Lee menunjukkan hasil strategi MOM mempunyai kinerja yang baik pada tanggapan peralihannya (respon transient), sedangkan hasil strategi COA mempunyai kinerja yang baik pada keadaan tunaknya (steady state). Bila menggunakan hasil strategi MOM, kinerja PLF cocok digunakan pada sistem relai multilevel (multilevel relay system), sedangkan hasil strategi COA cocok dengan pengatur konvensional PI. PLF yang didasari COA umumnya mempunyai mean square error yang lebih kecil dibandingkan dengan MOM.

# **BAB III**

## **PEMODELAN SISTEM**

### **DENGAN LOGIKA FUZZY**

Pemodelan sistem mempunyai pengaruh yang sangat penting dalam melakukan analisis terhadap kelakuan dinamik suatu sistem tenaga. Pemodelan pada PLTA Saguling dengan mesin sinkron (mesin tunggal) dibuat mengacu pada model sistem yang diturunkan oleh De Mello dan Concordia.

#### **3.1 FREKUENSI PADA SISTEM TENAGA**

Proses pembangkitan tenaga listrik pada PLTA adalah sebagai berikut : air sebagai sumber energi mengalir menggerakkan turbin yang merupakan penggerak mula generator. Generator mengonversikan tenaga mekanik menjadi tenaga listrik yang akan disalurkan kepada konsumen sesuai dengan kebutuhan. Jika terjadi perubahan kebutuhan daya listrik di sisi beban, maka akan menyebabkan terjadinya perubahan frekuensi.

Kecepatan sudut generator dipengaruhi oleh torsi mekanis generator dengan hubungan :

$$f = \omega / 2\pi \quad (3.1)$$

dengan

$f$  : kecepatan sudut mesin



$\omega$  : perubahan kecepatan sudut mesin

Kecepatan sudut generator dipengaruhi oleh torsi mekanis generator dengan hubungan :

$$H \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (3.2)$$

dengan

$T_m$  : torsi mekanis

$T_e$  : torsi elektris

Jadi frekuensi yang dihasilkan oleh generator merupakan fungsi torsi mekanis generator. Pada PLTA, ditinjau dari penggerak turbin, pengaturan frekuensi dilakukan dengan mengatur aliran air yang melalui pipa pesat (penstock).

Pada sistem tenaga listrik, dengan adanya fluktuasi beban maka akan menyebabkan frekuensi sistem berfluktuasi pula. Selama fluktuasi frekuensi ini tidak melampaui batas yang ditetapkan, maka hal ini tidak begitu berpengaruh pada kestabilan sistem.

Frekuensi pada sistem tenaga merupakan indikator kualitas pelayanan tenaga listrik. Untuk menjaga kualitas pelayanan tenaga listrik, maka diperlukan pengaturan frekuensi yang bekerja sesuai dengan naik turunnya beban sehingga frekuensi sistem dapat dijaga pada harga normalnya. Dalam pengoperasian sistem tenaga, frekuensi sistem tidak boleh bekerja lebih rendah dari pada frekuensi yang telah ditetapkan (perubahan maksimum yang diijinkan  $\pm 0,5$  Hz) karena [19] :

- a. Ketika frekuensi turun di bawah 49,5 Hz beberapa tipe turbin mengalami getaran berlebihan sehingga dapat menyebabkan kerusakan.

- b. Saat frekuensi turun di bawah 49 Hz, alat pengatur turbin membuka penuh dan unit pembangkit menjadi terbebani penuh. Apabila terjadi penurunan lebih lanjut, maka akan menyebabkan jatuhnya output tenaga dan akhirnya kehilangan pembangkitan.
- c. Ketika frekuensi turun, penguat-penguat generator kehilangan kecepatannya dan emf generator berkurang, tenaga pada unit-unit sistem juga turun. Hal ini mengakibatkan jatuhnya tegangan dan lepasnya konsumen.

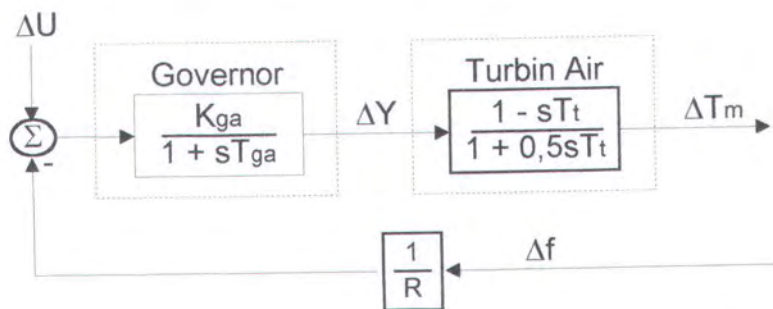
Untuk mengembalikan harga frekuensi pada nilai nominalnya ada empat mekanisme yaitu :

1. Pengaturan sendiri oleh sistem, jika frekuensi sistem turun daya juga akan turun. Besarnya daya (MW) yang turun karena turunnya frekuensi setiap Hz disebut konstanta frekuensi beban (Load Frequency Constant). Di samping itu untuk gangguan yang tiba-tiba, energi kinetis pada rotor mesin pembangkit dapat bertindak mencegah perubahan frekuensi.
2. Pengaturan sendiri oleh pusat-pusat pembangkit yang bekerja dalam keadaan governor free operation (pengaturan primer). Respon pengaturan tergantung oleh karakteristik governor serta batas kemampuan fisik pusat pembangkit.
3. Pada tingkat pengaturan primer masih terdapat penyimpangan frekuensi yang statis. Maka pengaturan selanjutnya diambil oleh pengaturan frekuensi yang bekerja secara manual ataupun otomatis

- (pengaturan sekunder). Mekanisme pengaturan sekunder adalah memperkecil penyimpangan frekuensi secara lebih teliti sehingga dapat mencapai harga frekuensi nominalnya.
4. Setelah tercapainya frekuensi pada harga nominal, pengaturan disesuaikan dengan Economic Load Dispatch (ELP) secara manual maupun otomatis, yang sifatnya untuk mengatur distribusi beban terhadap pusat pembangkit.

### 3.2 TURBIN DAN SISTEM PENGENDALIANNYA

Model turbin dan sistem pengendalnya yang dipakai di sini adalah mengacu pada model IEEE seperti pada diagram blok di bawah ini :



**Gambar 3.1** Diagram blok turbin air dan pengaturannya [8]

dengan

- $\Delta Y$  : perubahan tinggi katup
- $T_t$  : waktu tanggap turbin air
- $T_{ga}$  : waktu tanggap pengatur turbin air
- $K_{ga}$  : penguatan pengatur turbin air
- $R$  : konstanta pengatur turbin air

$\Delta U$  : perubahan sinyal kontrol umpan balik

Dari gambar di atas dapat dijabarkan menjadi persamaan berikut :

$$\begin{aligned}\Delta Y &= \frac{K_{ga}}{1+sT_{ga}} \left( -\frac{\Delta f}{R} + U \right) \\ \Delta Y + T_{ga} \Delta \dot{Y} &= -\frac{K_{ga} \Delta f}{R} + K_g U \\ \Delta \dot{Y} &= -\frac{\Delta Y}{T_{ga}} - \frac{K_{ga} \Delta f}{T_{ga} R} + \frac{K_{ga} U}{T_{ga}}\end{aligned}\quad (3.3)$$

$$\begin{aligned}\Delta T_m &= \frac{1-sT_t}{1+0,5sT_t} \Delta Y \\ \Delta T_m + 0,5T_t \Delta \dot{T}_m &= \Delta Y - T_t \Delta \dot{Y} \\ 0,5T_t \Delta \dot{T}_m &= -T_m + \Delta Y - T_t \Delta \dot{Y} \\ \Delta \dot{T}_m &= -\frac{2\Delta T_m}{T_t} + \frac{2\Delta Y}{T_t} - 2\Delta \dot{Y}\end{aligned}\quad (3.4)$$

### 3.3 MODEL BEBAN

Kenaikan daya masukan ke beban generator dinyatakan sebagai  $\Delta P_G - \Delta P_D$ , dengan  $\Delta P_G = \Delta P_t$  yaitu pertambahan daya keluaran turbin (diasumsikan rugi-rugi generator diabaikan) dan  $\Delta P_D$  adalah pertambahan beban. Kenaikan daya masukan ke sistem tenaga dihitung dengan dua cara :

1. Laju pertambahan energi kinetik yang tersimpan dalam rotor generator.

Pada frekuensi normal ( $f_0$ ) energi kinetik yang tersimpan adalah :

$$W_0 = H \times P_r \quad \text{kW.det (kilojoules)} \quad (3.5)$$

dengan  $P_r$  adalah kapasitas generator (kW) dan  $H$  adalah konstanta inersia.

Energi kinetik pada frekuensi  $f_0 + \Delta f$  adalah :



$$W = \left[ \frac{f_o + \Delta f}{f_o} \right]^2 W_o \cong 1 + \left[ \frac{2\Delta f}{f_o} \right] HP_r \quad (3.6)$$

Laju perubahan energi kinetik yaitu :

$$\frac{dW}{dt} = \frac{2W_o}{f_o} \frac{d(\Delta f)}{dt} \quad (3.7)$$

2. Laju perubahan beban terhadap frekuensi yaitu  $\delta P_D / \delta f$  dapat dianggap konstan untuk perubahan frekuensi yang kecil dan dapat dinyatakan sebagai :

$$\left[ \frac{\delta P_D}{dt} \right] \Delta f = D \Delta f \quad (3.8)$$

dengan D adalah konstanta positif untuk beban motor yang predominan dan D dapat ditentukan secara empiris. Persamaan dinamis daya dapat ditulis :

$$\begin{aligned} \Delta f(s) &= \frac{\Delta P_G(s) - \Delta P_G(s)}{D + \frac{2H}{f_o} s} \\ &= [\Delta P_G(s) - \Delta P_G(s)] \left( \frac{K_p}{1 + sT_p} \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

dengan :

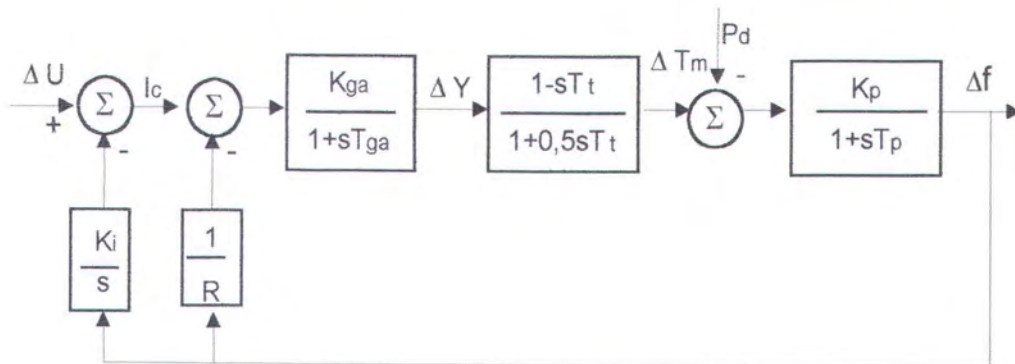
$$T_p = \frac{2H}{Df_o}$$

$$K_p = 1/D$$

$T_p$  : konstanta waktu sistem tenaga

$K_p$  : penguatan/gain sistem tenaga

Diagram blok sistem pengaturan frekuensi secara keseluruhan :



**Gambar 3.2** Diagram Blok Sistem Pengaturan Frekuensi [11]

dengan

- $I_c$  : input kontrol
- $P_d$  : sinyal gangguan
- $K_i$  : konstanta integrator

### 3.4 DESAIN PENGATUR LOGIKA FUZZY

Dalam mendesain suatu pengatur logika fuzzy, seperti yang telah diuraikan pada bab II, yang harus dilakukan pada awal perancangan adalah menentukan sistem yang akan diatur. Penentuan sistem akan berhubungan dengan perilaku sistem, yang meliputi tinjauan kualitatif masukan dan keluaran dan strategi pengaturannya.

Pengaturan sistem akan menentukan bentuk basis pengetahuan yang akan dipakai. Proses untuk menentukan basis pengetahuan dalam pengatur logika fuzzy adalah sebagai berikut [15] :

1. Menggambarkan strategi yang dilakukan operator manusia dalam mengoperasikan suatu sistem pengaturan.
2. Menentukan bentuk-bentuk pengertian linguistik dalam sistem tersebut.
3. Menentukan model untuk memprediksi hasil operasi.
4. Mengkonversikan strategi linguistik operator manusia menjadi aturan dasar.

Hasil rancangan diwujudkan dalam suatu algoritma pengaturan yang direalisasikan dalam bentuk perangkat lunak komputer. Untuk proses selanjutnya akan dilakukan simulasi pada sistem yang telah ditentukan. Perancangan sistem pengaturan dengan menggunakan pengatur logika fuzzy sebenarnya tidak memerlukan model matematis plant. Karena pada rancangan ini dilakukan simulasi, maka diperlukan model matematis untuk mencari hubungan input-outputnya.

#### **3.4.1 Penentuan Variabel Masukan dan Keluaran**

Sistem yang ditunjukkan pada gambar 3.2 selalu membutuhkan umpan balik dari keluaran. Sinyal umpan balik dibandingkan dengan sinyal referensi dan berfungsi untuk menghilangkan selisih antara masukan dan keluaran.

Variabel masukan PLF yang digunakan yaitu variabel error dan variabel perubahan errornya, sedangkan variabel keluaran PLF adalah variabel sinyal atur. Variabel-variabel masukan dan keluaran lebih lanjut didefinisikan sebagai berikut

- error ( $e[k]$ ) adalah sinyal referensi dikurangi sinyal umpan balik :

$$e[k] = r[k] - c[k] \quad (3.10)$$

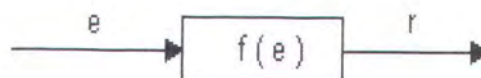
- perubahan error  $\dot{e}[k]$  adalah error sekarang dikurangi error sebelumnya :

$$\dot{e}[k] = e[k] - e[k-1] \quad (3.11)$$

- sinyal atur  $u[k]$  adalah sinyal atur yang dihasilkan dari mekanisme inferensi PLF dan tidak ada hubungannya dengan sinyal atur sebelumnya. Jadi sinyal atur merupakan fungsi error.

$$R[k] = f(e) \quad (3.12)$$

Maka diagram blok PLF adalah :



**Gambar 3.3** Diagram blok PLF

### 3.4.2 Penyusunan Basis Data

Penyusunan basis data berarti mendefinisikan himpunan-himpunan fuzzy dalam daerah masukan dan keluaran. Prosedur ini ditekankan pada pembagian ruang masukan dan keluaran dengan sejumlah nilai variabel linguistik yang menggunakan fungsi keanggotaan tertentu. Dalam penyusunan basis data, fungsi keanggotaan yang dipakai adalah bentuk fungsi segitiga seragam (uniform).

Langkah-langkah penyusunan basis data meliputi :



1. Skala pemetaan

Untuk fungsi seragam, kuantisasi dan normalisasi tidak diperlukan karena masukannya kontinyu dan fungsi keanggotaanya didefinisikan secara fungsional dan bersifat simetris.

2. Pembagian ruang masukan dan keluaran

Pembagian dilakukan dengan 7 variabel linguistik, yaitu Negatif Besar (NB), Negatif Sedang (NS), Negatif Kecil (NK), Nol (NL), Positif Kecil (PK), Positif Sedang (PS) dan Positif Besar (PB).

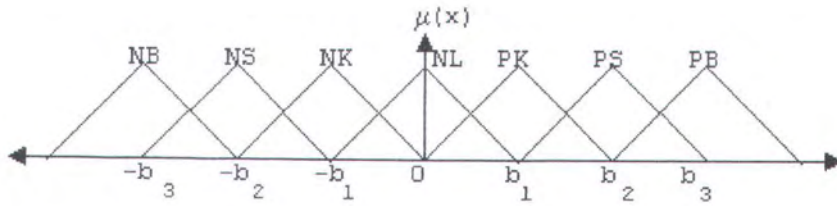
3. Pemilihan fungsi keanggotaan

Fungsi keanggotaan yang akan digunakan adalah fungsi segitiga dengan parameter yang telah ditentukan.

Berdasarkan ketentuan tersebut, dilakukan penyusunan basis data yang hasilnya diungkapkan dalam bentuk tabel dan tafsiran grafisnya. Tabel yang ditunjukkan di bawah adalah tabel untuk bentuk segitiga uniform.

**Tabel 3.1** Pendefinisian bentuk fungsi segitiga seragam

Range Segmen	Jangkauan	a	b	Himpunan Fuzzy
(- R , R )	(-R, -2/3 R)	R	1/3 R	NB
	(-R, -1/3 R)	-2/3 R	1/3 R	NS
	(-2/3 R, 0)	-1/3 R	1/3 R	NK
	(-1/3 R, 1/3 R)	0	1/3 R	NL
	(0, 2/3 R)	1/3 R	1/3 R	PK
	(1/3 R, R)	2/3 R	1/3 R	PS
	(2/3 R, R)	R	1/3 R	PB



**Gambar 3.4** Penafsiran grafis tabel 3.1

Pembagian ruang masukan dan keluaran menghasilkan basis data sebagai berikut :

1. Error ( $e[k]$ )

$$\mu_{NB}(e[k]) = 1 - (\sqrt{((e[k] + R_1)^2)})/b_1$$

$$\mu_{NS}(e[k]) = 1 - (\sqrt{((e[k] + 2/3 R_1)^2)})/b_1$$

$$\mu_{NK}(e[k]) = 1 - (\sqrt{((e[k] + 1/3 R_1)^2)})/b_1$$

$$\mu_{NL}(e[k]) = 1 - (\sqrt{(e[k])^2})/b_1$$

$$\mu_{PK}(e[k]) = 1 - (\sqrt{((e[k] - 1/3 R_1)^2)})/b_1$$

$$\mu_{PS}(e[k]) = 1 - (\sqrt{((e[k] - 2/3 R_1)^2)})/b_1$$

$$\mu_{PB}(e[k]) = 1 - (\sqrt{((e[k] - R_1)^2)})/b_1$$

Dengan rata-rata  $R_1$  dan sebaran  $b_1 = 1/3 R_1$

2. Perubahan error ( $\dot{e}[k]$ )

$$\mu_{NB}(\dot{e}[k]) = 1 - (\sqrt{((\dot{e}[k] + R_2)^2)})/b_2$$

$$\mu_{NS}(\dot{e}[k]) = 1 - (\sqrt{((\dot{e}[k] + 2/3 R_2)^2)})/b_2$$

$$\mu_{NK}(\dot{e}[k]) = 1 - (\sqrt{((\dot{e}[k] + 1/3 R_2)^2)})/b_2$$

$$\mu_{NL}(\acute{e}[k]) = 1 - (\sqrt{(\acute{e}[k])^2})/b_2$$

$$\mu_{PK}(\acute{e}[k]) = 1 - (\sqrt{((\acute{e}[k] - 1/3 R_2)^2)})/b_2$$

$$\mu_{PS}(\acute{e}[k]) = 1 - (\sqrt{((\acute{e}[k] - 2/3 R_2)^2)})/b_2$$

$$\mu_{PB}(\acute{e}[k]) = 1 - (\sqrt{((\acute{e}[k] - R_2)^2)})/b_2$$

Dengan rataaan  $R_2$  dan sebaran  $b_2 = 1/3 R_2$

### 3. Sinyal atur ( $u[k]$ )

$$\mu_{NB}(u[k]) = 1 - (\sqrt{((u[k] + R_3)^2)})/b_3$$

$$\mu_{NS}(u[k]) = 1 - (\sqrt{((u[k] + 2/3 R_3)^2)})/b_3$$

$$\mu_{NK}(u[k]) = 1 - (\sqrt{((u[k] + 1/3 R_3)^2)})/b_3$$

$$\mu_{NL}(u[k]) = 1 - (\sqrt{(u[k])^2})/b_3$$

$$\mu_{PS}(u[k]) = 1 - (\sqrt{((u[k] - 1/3 R_3)^2)})/b_3$$

$$\mu_{PS}(u[k]) = 1 - (\sqrt{((u[k] - 2/3 R_3)^2)})/b_3$$

$$\mu_{PB}(u[k]) = 1 - (\sqrt{((u[k] - R_3)^2)})/b_3$$

Dengan rataaan  $R_3$  dan sebaran  $b_3 = 1/3 R_3$

#### 3.4.3 Penyusunan Aturan Dasar

Setelah perilaku pengaturannya dipahami, maka diturunkan kaidah atur secara heuristik, sebagaimana telah diuraikan pada bab II. Penurunan prototipe kaidah atur dan penyempurnaannya menghasilkan suatu tabel yang disebut dengan tabel MacVicar-Whelan. Kaidah atur menggunakan basis data yang telah disusun kemudian diturunkan sesuai dengan pola pada tabel MacVicar-Whelan tersebut,

sehingga diperoleh kaidah atur sebanyak 7 variabel  $e \times 7$  variabel  $\acute{e} = 49$  kaidah atur.

**Tabel 3.2** *Tabel Keputusan Aturan Kontrol Fuzzy MacVicar-Whelan [14]*

PERUBAHAN ERROR ( $\acute{e}$ )								
E R R O R ( $e$ )		NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB
	NB	NB	NB	NB	NB	NS	NK	NK
	NS	NB	NB	NB	NS	NK	NL	NL
	NK	NB	NB	NS	NK	NL	PK	PK
	NL	NB	NS	NK	NL	PK	PS	PS
	PK	NS	NK	NL	PK	PS	PB	PB
	PS	NK	PL	PK	PS	PB	PB	PB
	PB	NL	PK	PS	PB	PB	PB	PB

Jika tabel di atas dijabarkan dengan pernyataan linguistik maka diperoleh seperangkat pernyataan linguistik fuzzy dengan nomor urutan sesuai nomor baris-kolom pada tabel di atas , yaitu :

- R<sub>1</sub> : Jika  $e$  adalah NB dan  $\acute{e}$  adalah NB maka  $u$  adalah NB
- juga R<sub>2</sub> : Jika  $e$  adalah NB dan  $\acute{e}$  adalah NS maka  $u$  adalah NB
- juga R<sub>3</sub> : Jika  $e$  adalah NB dan  $\acute{e}$  adalah NK maka  $u$  adalah NB
- juga R<sub>4</sub> : Jika  $e$  adalah NB dan  $\acute{e}$  adalah NL maka  $u$  adalah NB
- juga R<sub>5</sub> : Jika  $e$  adalah NB dan  $\acute{e}$  adalah PK maka  $u$  adalah NS
- juga R<sub>6</sub> : Jika  $e$  adalah NB dan  $\acute{e}$  adalah PS maka  $u$  adalah NK
- juga R<sub>7</sub> : Jika  $e$  adalah NB dan  $\acute{e}$  adalah PB maka  $u$  adalah NL
- juga R<sub>8</sub> : Jika  $e$  adalah NS dan  $\acute{e}$  adalah NB maka  $u$  adalah NB
- juga R<sub>9</sub> : Jika  $e$  adalah NS dan  $\acute{e}$  adalah NS maka  $u$  adalah NB
- juga R<sub>10</sub> : Jika  $e$  adalah NS dan  $\acute{e}$  adalah NK maka  $u$  adalah NB
- juga R<sub>11</sub> : Jika  $e$  adalah NS dan  $\acute{e}$  adalah NL maka  $u$  adalah NS



- juga R<sub>12</sub> : Jika  $e$  adalah NS dan  $\acute{e}$  adalah PK maka  $u$  adalah NK
- juga R<sub>13</sub> : Jika  $e$  adalah NS dan  $\acute{e}$  adalah PS maka  $u$  adalah NL
- juga R<sub>14</sub> : Jika  $e$  adalah NS dan  $\acute{e}$  adalah PB maka  $u$  adalah PK
- juga R<sub>15</sub> : Jika  $e$  adalah NK dan  $\acute{e}$  adalah NB maka  $u$  adalah NB
- juga R<sub>16</sub> : Jika  $e$  adalah NK dan  $\acute{e}$  adalah NS maka  $u$  adalah NB
- juga R<sub>17</sub> : Jika  $e$  adalah NK dan  $\acute{e}$  adalah NK maka  $u$  adalah NS
- juga R<sub>18</sub> : Jika  $e$  adalah NK dan  $\acute{e}$  adalah NL maka  $u$  adalah NK
- juga R<sub>19</sub> : Jika  $e$  adalah NK dan  $\acute{e}$  adalah PK maka  $u$  adalah NL
- juga R<sub>20</sub> : Jika  $e$  adalah NK dan  $\acute{e}$  adalah PS maka  $u$  adalah PK
- juga R<sub>21</sub> : Jika  $e$  adalah NK dan  $\acute{e}$  adalah PB maka  $u$  adalah PS
- juga R<sub>22</sub> : Jika  $e$  adalah NL dan  $\acute{e}$  adalah NB maka  $u$  adalah NB
- juga R<sub>23</sub> : Jika  $e$  adalah NL dan  $\acute{e}$  adalah NS maka  $u$  adalah NS
- juga R<sub>24</sub> : Jika  $e$  adalah NL dan  $\acute{e}$  adalah NK maka  $u$  adalah NK
- juga R<sub>25</sub> : Jika  $e$  adalah NL dan  $\acute{e}$  adalah NL maka  $u$  adalah NL
- juga R<sub>26</sub> : Jika  $e$  adalah NL dan  $\acute{e}$  adalah PK maka  $u$  adalah PK
- juga R<sub>27</sub> : Jika  $e$  adalah NL dan  $\acute{e}$  adalah PS maka  $u$  adalah PS
- juga R<sub>28</sub> : Jika  $e$  adalah NL dan  $\acute{e}$  adalah PB maka  $u$  adalah PB
- juga R<sub>29</sub> : Jika  $e$  adalah PK dan  $\acute{e}$  adalah NB maka  $u$  adalah NS
- juga R<sub>30</sub> : Jika  $e$  adalah PK dan  $\acute{e}$  adalah NS maka  $u$  adalah NK
- juga R<sub>31</sub> : Jika  $e$  adalah PK dan  $\acute{e}$  adalah NK maka  $u$  adalah NL
- juga R<sub>32</sub> : Jika  $e$  adalah PK dan  $\acute{e}$  adalah NL maka  $u$  adalah PK
- juga R<sub>33</sub> : Jika  $e$  adalah PK dan  $\acute{e}$  adalah PK maka  $u$  adalah PS

- juga R<sub>34</sub> : Jika  $e$  adalah PK dan  $\acute{e}$  adalah PS maka  $u$  adalah PB
- juga R<sub>35</sub> : Jika  $e$  adalah PK dan  $\acute{e}$  adalah PB maka  $u$  adalah PB
- juga R<sub>36</sub> : Jika  $e$  adalah PS dan  $\acute{e}$  adalah NB maka  $u$  adalah NK
- juga R<sub>37</sub> : Jika  $e$  adalah PS dan  $\acute{e}$  adalah NS maka  $u$  adalah NL
- juga R<sub>38</sub> : Jika  $e$  adalah PS dan  $\acute{e}$  adalah NK maka  $u$  adalah PK
- juga R<sub>39</sub> : Jika  $e$  adalah PS dan  $\acute{e}$  adalah NL maka  $u$  adalah PS
- juga R<sub>40</sub> : Jika  $e$  adalah PS dan  $\acute{e}$  adalah PK maka  $u$  adalah PB
- juga R<sub>41</sub> : Jika  $e$  adalah PS dan  $\acute{e}$  adalah PS maka  $u$  adalah PB
- juga R<sub>42</sub> : Jika  $e$  adalah PS dan  $\acute{e}$  adalah PB maka  $u$  adalah PB
- juga R<sub>43</sub> : Jika  $e$  adalah PB dan  $\acute{e}$  adalah NB maka  $u$  adalah NL
- juga R<sub>44</sub> : Jika  $e$  adalah PB dan  $\acute{e}$  adalah NS maka  $u$  adalah PK
- juga R<sub>45</sub> : Jika  $e$  adalah PB dan  $\acute{e}$  adalah NK maka  $u$  adalah PS
- juga R<sub>46</sub> : Jika  $e$  adalah PB dan  $\acute{e}$  adalah NL maka  $u$  adalah PB
- juga R<sub>47</sub> : Jika  $e$  adalah PB dan  $\acute{e}$  adalah PK maka  $u$  adalah PB
- juga R<sub>48</sub> : Jika  $e$  adalah PB dan  $\acute{e}$  adalah PS maka  $u$  adalah PB
- juga R<sub>49</sub> : Jika  $e$  adalah PB dan  $\acute{e}$  adalah PB maka  $u$  adalah PB

#### 3.4.4 Logika Pengambilan Keputusan

Logika pengambilan keputusan adalah suatu prosedur untuk menghitung sinyal atur berdasar basis pengetahuan (basis data dan aturan dasar) yang sudah disusun. Prosedur ini berupa operasi matematika yaitu operasi mini Mamdani terhadap pasangan masukan error dan perubahan error yang akan menghasilkan kesimpulan sinyal atur  $u_0$ .

Berdasarkan basis pengetahuan yang sudah disusun, setiap pasangan masukan error dan perubahan error akan membangkitkan 4 atau kurang dari 4 sinyal atur. Prosedur defuzzifikasi terhadap sinyal atur tersebut menghasilkan kesimpulan sinyal atur yang merupakan keluaran yang akan diumpankan ke pengatur.

### 3.3.5 Defuzzifikasi

Untuk mengubah sinyal atur fuzzy menjadi sinyal crisp, pada sinyal atur dari logika pengambilan keputusan dilakukan operasi defuzzifikasi. Metode defuzzifikasi yang akan digunakan adalah metode COA.

Sebagai contoh, misalkan PLF mendapat masukan berupa error  $e$  yang berada dalam himpunan PK dan PS dan  $\acute{e}$  yang berada dalam himpunan NL dan PK, maka pada kedua masukan ini akan dilakukan proses sebagai berikut :

- Fuzzifikasi dan penghitungan nilai keanggotaan

$$\mu_{PK}(e[k]) = 1 - (\sqrt{((e[k] - 1/3 R_1)^2)})/b_1$$

$$\mu_{PS}(e[k]) = 1 - (\sqrt{((e[k] - 2/3 R_1)^2)})/b_1$$

$$\mu_{NL}(\acute{e}[k]) = 1 - (\sqrt{(\acute{e}[k])^2})/b_2$$

$$\mu_{PK}(\acute{e}[k]) = 1 - (\sqrt{((\acute{e}[k] - 1/3 R_2)^2)})/b_2$$

nilai keanggotaan di himpunan lain adalah nol.

- Operasi minimum produk kartesian pada aturan dasar yang dibangkitkan

$$R_{32} : \alpha_{32} = \mu_{PK}(e) \wedge \mu_{NL}(\acute{e})$$

$$R_{33} : \alpha_{33} = \mu_{PK}(e) \wedge \mu_{PK}(\acute{e})$$

$$R_{39} : \alpha_{39} = \mu_{PS}(e) \wedge \mu_{NL}(\acute{e})$$

$$R_{40} : \alpha_{40} = \mu_{PS}(e) \wedge \mu_{PK}(\acute{e})$$



- Defuzzifikasi dengan metode COA

$$u_o = \frac{\sum_{i=1}^{49} \alpha_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$$

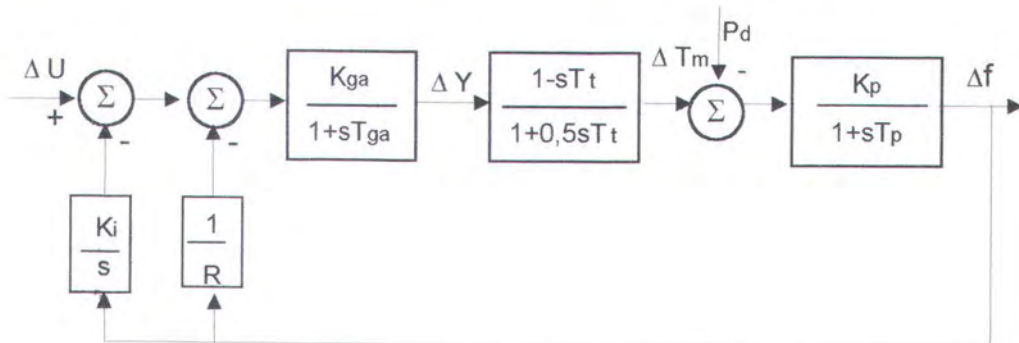
dengan  $a_i$  adalah rata-ran ( $u$ ) sesuai dengan nomor aturan dasarnya

$$u_o = \frac{\alpha_{32} a_{32} + \alpha_{33} a_{33} + \alpha_{39} a_{39} + \alpha_{40} a_{40}}{\alpha_{32} + \alpha_{33} + \alpha_{39} + \alpha_{40}}$$

sehingga diperoleh  $u$  sebagai kesimpulan sinyal atur crisp yang akan diumpankan ke pengontrol.

### 3.5 PEMBENTUKAN MODEL SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK

Dalam perancangan sistem pengatur logika fuzzy sebenarnya kita tidak memerlukan pembentukan model suatu sistem. Namun untuk melakukan simulasi dinamik sistem tenaga listrik mesin tunggal yang terhubung dengan bus infinit, maka perlu dibentuk model sistem tersebut. Model sistem pengaturan frekuensi PLTA Saguling diperlihatkan pada gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Model Sistem Mesin Tunggal Untuk Pengaturan Frekuensi



dengan

$\Delta U$  : aksi pengaturan PLF

$\Delta P_d$  : sinyal gangguan yang berupa perubahan torsi/daya elektrik

Dari model linier sistem tenaga listrik di atas disusun persamaan-persamaan keadaan dan persamaan keluaran sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\Delta \dot{f} &= -\frac{\Delta f}{T_p} + \frac{K_p \Delta T_m}{T_p} - \frac{K_p \Delta P_d}{T_p} \\ \Delta \dot{T}_m &= \frac{2K_{ga} \Delta f}{T_{ga} R} - \frac{2\Delta T_m}{T_t} + \left( \frac{2}{T_t} + \frac{2}{T_{ga}} \right) \Delta Y + \frac{2K_{ga} \Delta I_c}{T_{ga}} - \frac{2K_{ga} U}{T_{ga}} \\ \Delta \dot{Y} &= -\frac{K_{ga} \Delta f}{T_{ga} R} - \frac{\Delta Y}{T_{ga}} - \frac{K_{ga} \Delta I_c}{T_{ga}} + \frac{K_{ga} U}{T_{ga}} \\ \Delta \dot{I}_c &= K_i \Delta f\end{aligned}$$

Dari persamaan keadaan sistem di atas dapat dibentuk matriks persamaan keadaan sistem :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D\Delta P_d(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

Matriks persamaan keadaan model sistem di atas yang digunakan untuk pengaturan frekuensi :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{f} \\ \Delta \dot{T}_m \\ \Delta \dot{Y} \\ \Delta \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & \dots & a_{14} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{41} & \dots & \dots & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & \dots & b_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} \\ \dots \\ \dots \\ u_{41} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & \dots & d_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{d11} \\ \dots \\ \dots \\ \Delta P_{d41} \end{bmatrix}$$

Nilai komponen-komponen matriks **A** dapat ditentukan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} a(1,1) &= -\frac{1}{T_p} & ; a(1,2) &= \frac{K_p}{T_p} & ; a(1,3) &= 0 & ; a(1,4) &= 0 \\ a(2,1) &= \frac{2K_{ga}}{T_{ga}R} & ; a(2,2) &= -\frac{2}{T_t} & ; a(2,3) &= \frac{2}{T_t} + \frac{2}{T_{ga}} & ; a(2,4) &= \frac{2K_{ga}}{T_{ga}} \\ a(3,1) &= -\frac{K_{ga}}{T_{ga}R} & ; a(3,2) &= 0 & ; a(3,3) &= -\frac{1}{T_{ga}} & ; a(3,4) &= -\frac{K_{ga}}{T_{ga}} \\ a(4,1) &= K_i & ; a(4,2) &= 0 & ; a(4,3) &= 0 & ; a(4,4) &= 0 \end{aligned}$$

Persamaan keadaan untuk mendapatkan matriks **B** dapat diturunkan dengan melihat variabel  $u$  pada persamaan keadaan untuk mendapatkan matriks **A** sebagai berikut :

$$b(1,1) = 0 \quad ; b(1,2) = -\frac{2K_{ga}}{T_{ga}} \quad ; b(1,3) = \frac{K_{ga}}{T_{ga}} \quad ; b(1,4) = 0$$

Persamaan keadaan untuk mendapatkan matriks **D** dapat diturunkan dengan melihat variabel  $\Delta P_d$  pada persamaan keadaan untuk mendapatkan matriks **A** sebagai berikut :

$$d(1,1) = -\frac{K_p}{T_p} \quad ; d(1,2) = 0 \quad ; d(1,3) = 0 \quad ; d(1,4) = 0$$

Bentuk umum persamaan matriks **C** adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & \dots & c_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

Komponen matriks **C** adalah :

$$c(1,1) = 1 \quad ; \quad c(1,2) = 0 \quad ; \quad c(1,3) = 0 \quad ; \quad c(1,4) = 0$$

## **BAB IV**

### **STUDI SIMULASI DAN ANALISIS**

Setelah perancangan selesai, maka dilakukan simulasi untuk menunjukkan kemampuan Pengatur Logika Fuzzy dalam melakukan proses pengaturan. Simulasi komputer ini menggunakan alat bantu komputer dengan program aplikasi MATLAB for Windows. Sebelum membahas hasil simulasi, akan dijelaskan lebih dahulu algoritma sistem pengaturan proses dengan Pengatur Logika Fuzzy dengan menggunakan diagram alir dari program simulasi.

#### **4.1 PARAMETER-PARAMETER PENGATUR**

Parameter-parameter yang berperan pada Pengatur Logika Fuzzy adalah :

- Jangkauan semesta pembicaraan error ( $e$ ), perubahan error ( $\dot{e}$ ) dan perubahan sinyal atur ( $u$ ) adalah  $[-R, R]$ .
- Rataan variabel-variabel linguistik error, perubahan error dan perubahan sinyal atur berturut-turut  $R1$ ,  $R2$  dan  $RuF$ .
- Sebaran variabel-variabel linguistik error dan perubahan error adalah  $b1$  dan  $b2$ .
- Jangkauan semesta pembicaraan error yang dinormalkan diberi harga pada masukan minimum dan maksimum adalah  $[-1 \text{ Hz}, 1 \text{ Hz}]$ .
- Jangkauan semesta pembicaraan perubahan error yang dinormalkan diberi harga pada masukan minimum dan maksimum adalah  $[-2 \text{ Hz}, 2 \text{ Hz}]$ .



- Jangkauan semesta pembicaraan sinyal atur yang dinormalkan diberi harga pada masukan minimum dan maksimum adalah [-1 Hz , 1 Hz].
- Waktu pencuplikan ditetapkan 0,05 detik.
- Variabel linguistik error, perubahan error dan perubahan sinyal atur yang digunakan adalah tujuh variabel linguistik seperti ditunjukkan pada tabel di bawah

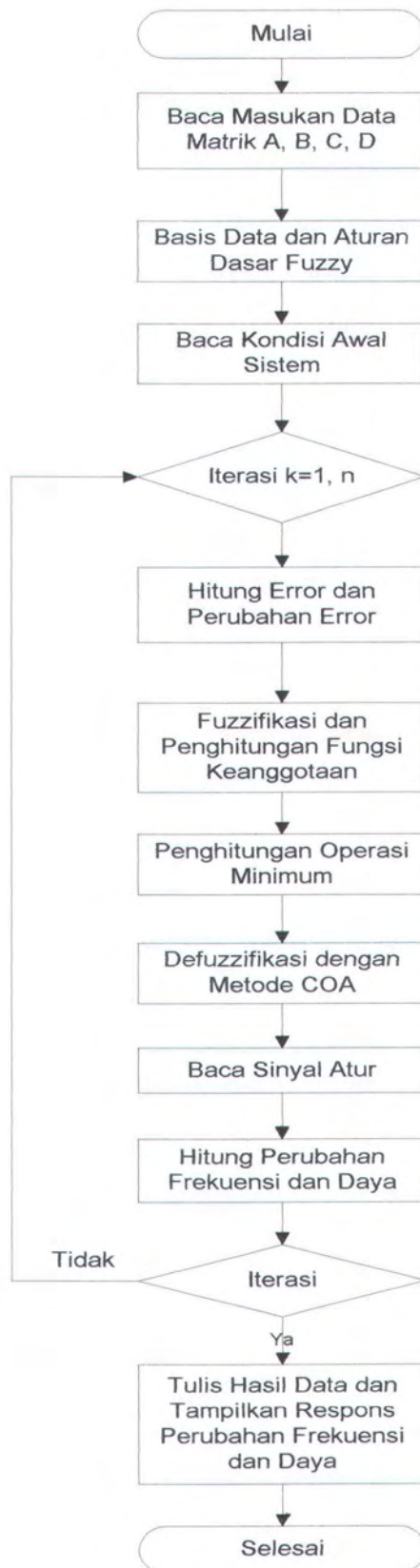
**Tabel 4.1** *Tabel Keputusan Perubahan Sinyal Atur*

PERUBAHAN ERROR (é)

		NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB
ERROR (e)	NB	NB	NB	NB	NB	NS	NK	NK
	NS	NB	NB	NB	NS	NK	NL	NL
	NK	NB	NB	NS	NK	NL	PK	PK
	NL	NB	NS	NK	NL	PK	PS	PS
	PK	NS	NK	NL	PK	PS	PB	PB
	PS	NK	PL	PK	PS	PB	PB	PB
	PB	NL	PK	PS	PB	PB	PB	PB

4.2 DIAGRAM ALIR PROGRAM SIMULASI

Untuk menjelaskan program simulasi, di bawah ini ditunjukkan diagram alir program simulasi.



**Gambar 4.1** Diagram Alir Program Simulasi

Dari diagram alir di atas, program simulasi dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Membaca data masukan parameter-parameter mesin, yaitu :  $K_{ga}$ ,  $T_{ga}$ ,  $T_t$ ,  $R$ ,  $K_p$  dan  $T_p$
- Memasukkan harga parameter-parameter mesin ke dalam matrik yaitu : matrik A, B, C dan D, membaca kondisi awal,  $f_o$ ,  $T_{mo}$ ,  $Y_o$  dan  $I_{co}$ , basis data dan look up table yaitu Re1, Re2 dan RuF.
- Menghitung besarnya error ( $e$ ) = referensi – simpangan sinyal output dan perubahan error ( $\dot{e}$ ) = error sekarang – error sebelumnya. Fungsi keanggotaan fuzzy untuk error, perubahan error dan sinyal atur adalah fungsi keanggotaan segitiga.
- Fuzzifikasi nilai keanggotaan error dan perubahan error dan dilanjutkan dengan penalaran fuzzy yaitu :  $\mu_{e1}[k]$ ,  $\mu_{e2}[k]$  dan  $\alpha = \min(\mu_{e1}[k], \mu_{e2}[k])$ .
- Menghitung hasil sinyal atur dengan metode fuzzifikasi Center of Area (COA) yakni :  $u[k] = \text{JUMAT}/\text{JUMBA}$ .
- Prosedur perhitungan untuk perubahan frekuensi ( $\Delta f$ ) dengan menggunakan perhitungan waktu diskrit yang diubah dari persamaan keadaan.
- Proses selanjutnya adalah menampilkan hasil simulasi yang ditunjukkan dengan grafik.

### 4.3 DATA PLTA SAGULING

Harga parameter-parameter mesin pada sistem pembangkit yang diperlukan untuk simulasi adalah :

**Tabel 4.1** *Data PLTA Saguling*

$K_{ga}$ (penguatan pengatur turbin air)	18
$T_{ga}$ (waktu tanggap pengatur turbin air)	0,02
$T_t$ (waktu tanggap turbin air)	0,023
$R$ (konstanta pengatur turbin air)	0,5
$K_p$ (konstanta gain sistem)	0,5
$T_p$ (konstanta waktu sistem)	4
$K_i$ (konstanta gain integrator)	0,5
$T_s$ (waktu sampling)	0,05

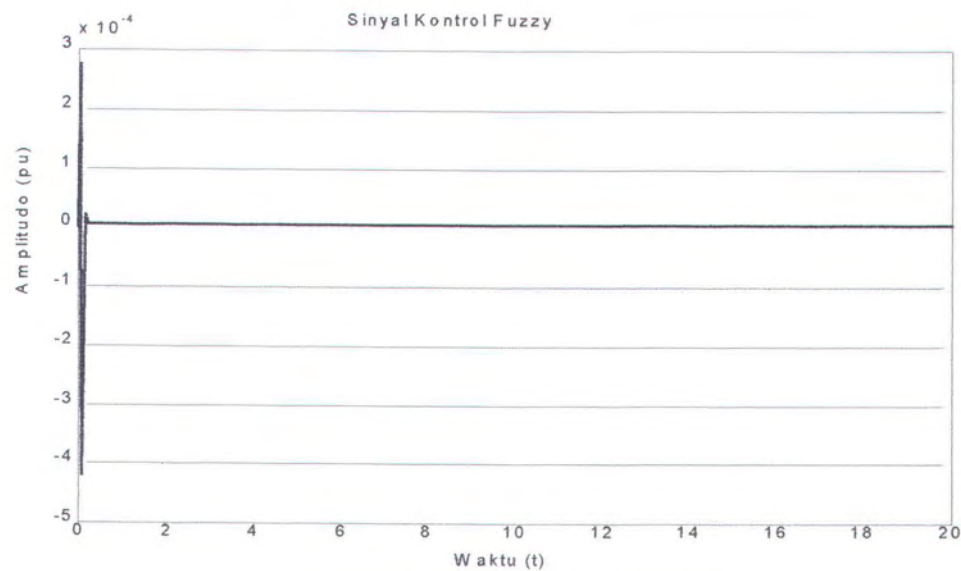
### 4.4 SIMULASI DAN ANALISIS

Tujuan simulasi ini adalah untuk mengetahui peranan pengatur logika fuzzy yang diberikan pada sistem. Pada simulasi ini gangguan sistem yang diberikan berupa sinyal sesaat yaitu perubahan daya listrik yang sebanding dengan torsi listrik  $\Delta P_d$  yang berupa penambahan dan pengurangan sebesar 5% dan juga gangguan sebesar 2,5%.

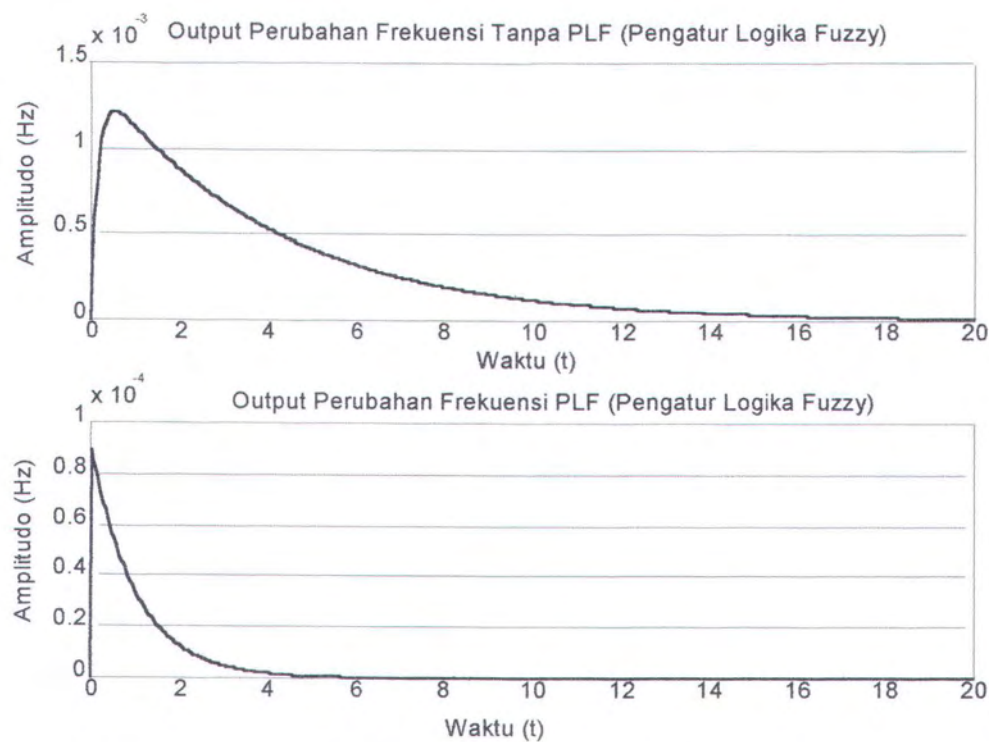
Dengan simulasi ini akan dilihat kinerja frekuensi sebelum dan sesudah diterapkan pengatur logika fuzzy dengan memberikan gangguan berupa torsi. Penilaian kinerja sistem meliputi respon waktu dan amplitudo frekuensi ( $f$ ), torsi mekanik ( $T_m$ ) dan perubahan katup ( $\Delta Y$ ). Berikut ini akan ditunjukkan hasil simulasi untuk sistem yang menggunakan logika fuzzy dengan yang tidak menggunakan PLF.



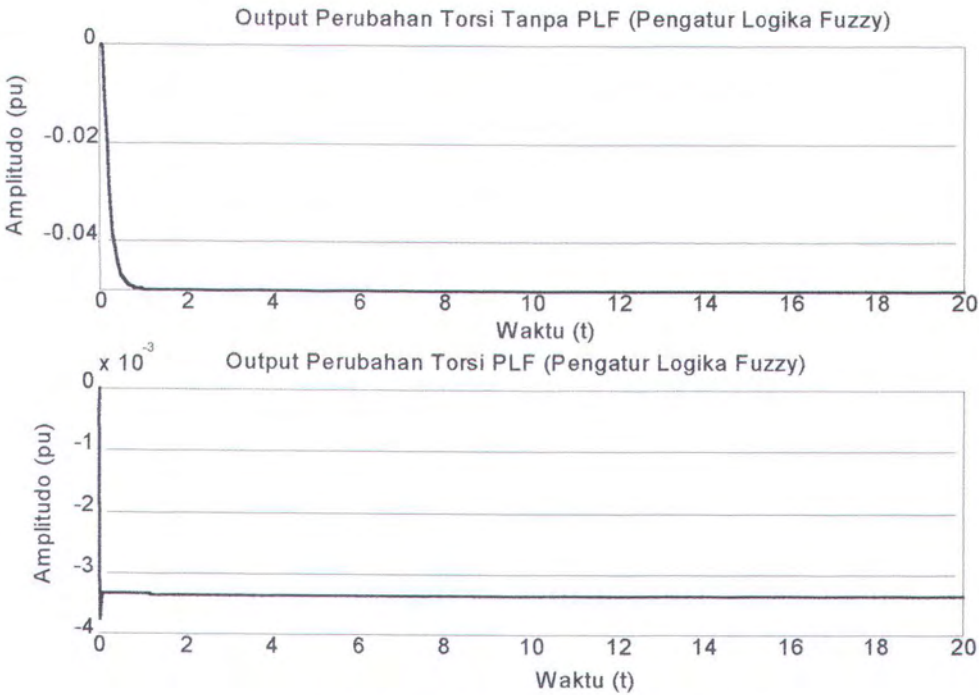
- Penambahan beban sebesar 5%



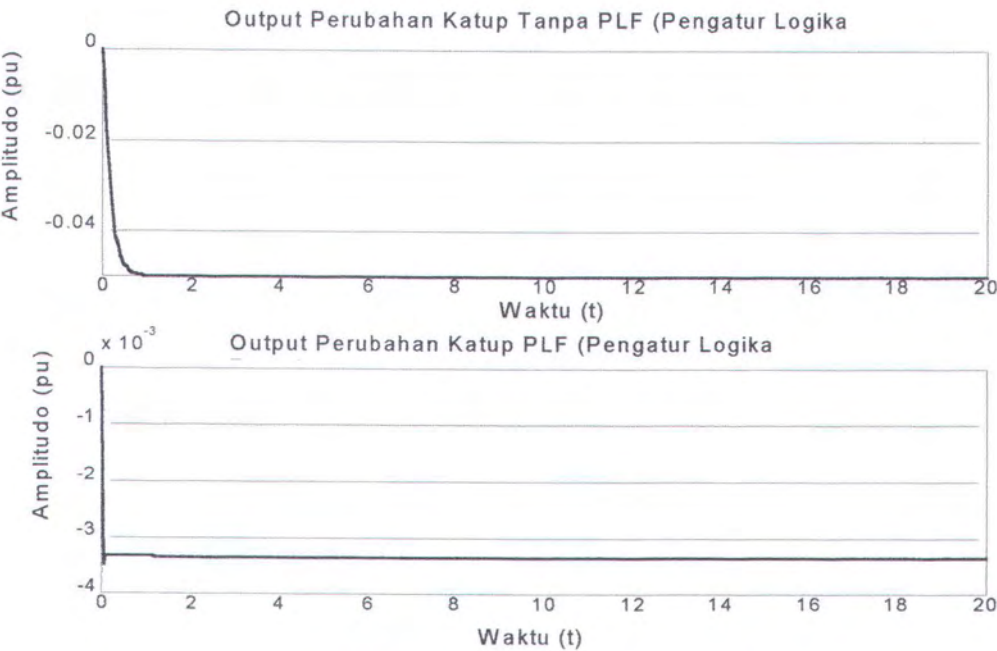
Gambar 4.2 Sinyal Kontrol Fuzzy



Gambar 4.3 Perubahan Frekuensi Sistem

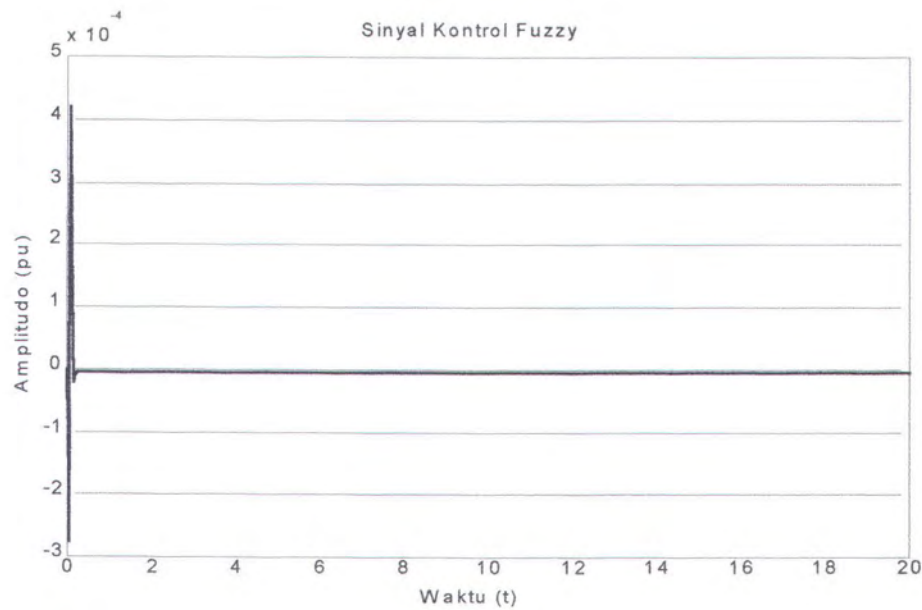


Gambar 4.4 Perubahan Torsi Sistem

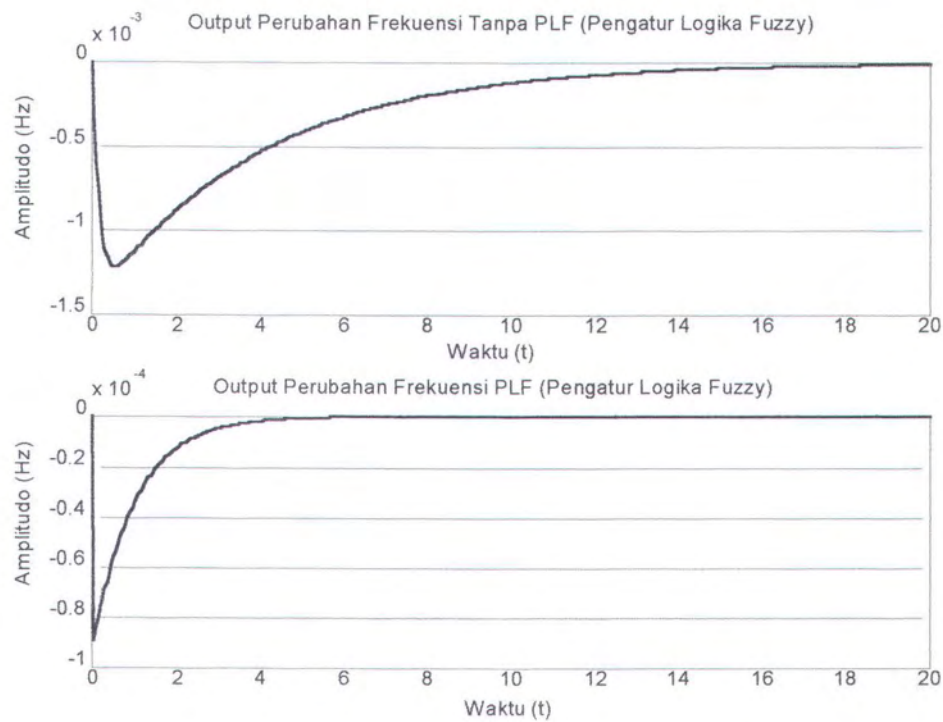


Gambar 4.5 Perubahan Katup Sistem

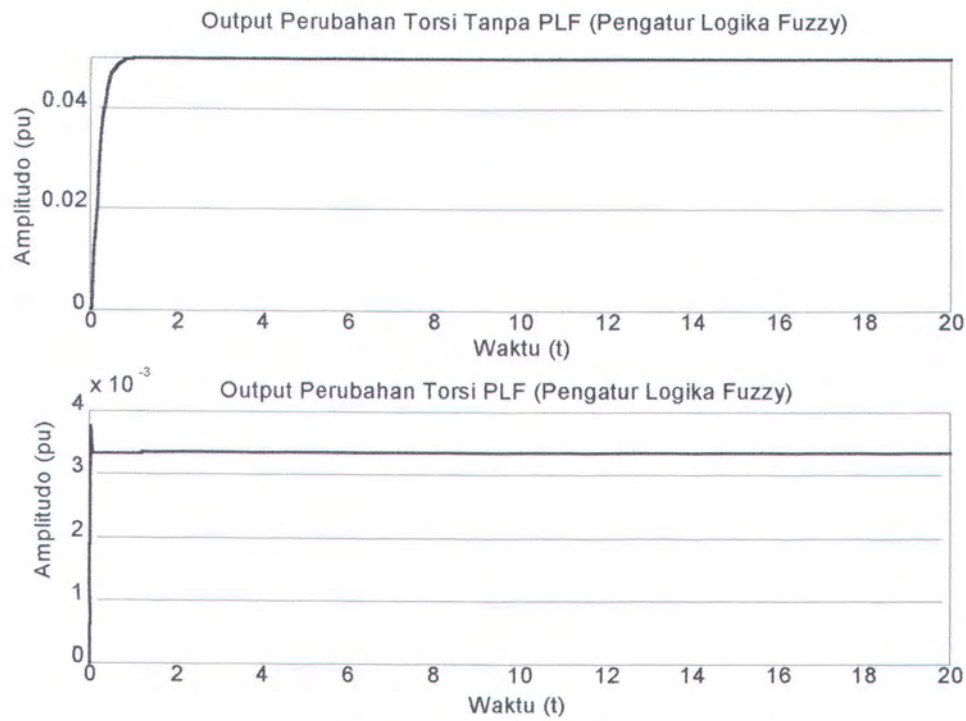
- Pengurangan beban sebesar 5%



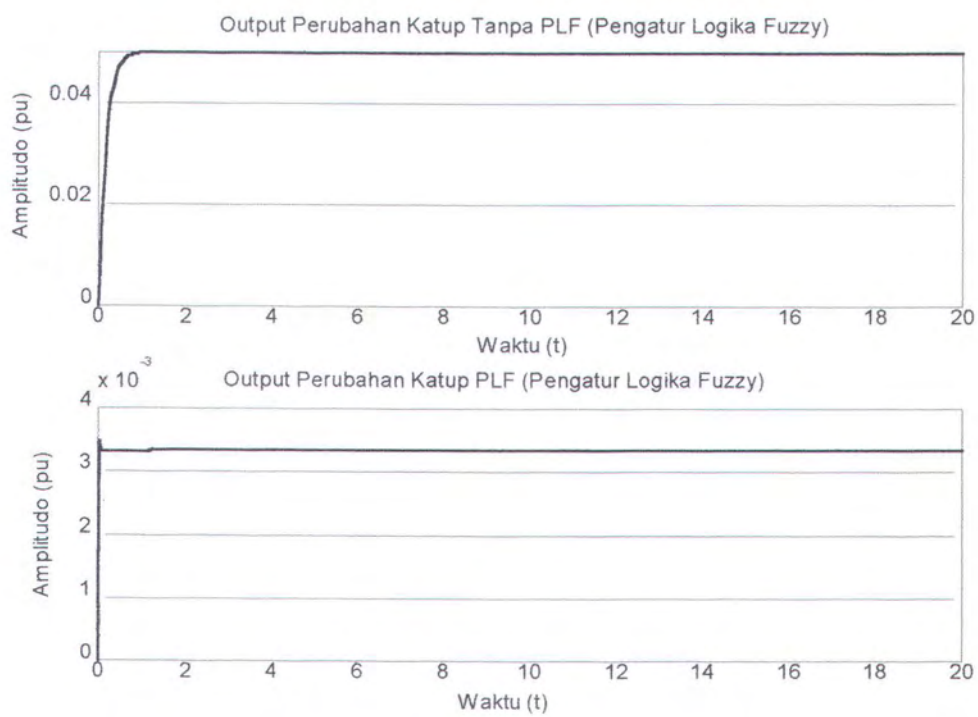
Gambar 4.6 Sinyal Kontrol Fuzzy



Gambar 4.7 Perubahan Frekuensi Sistem



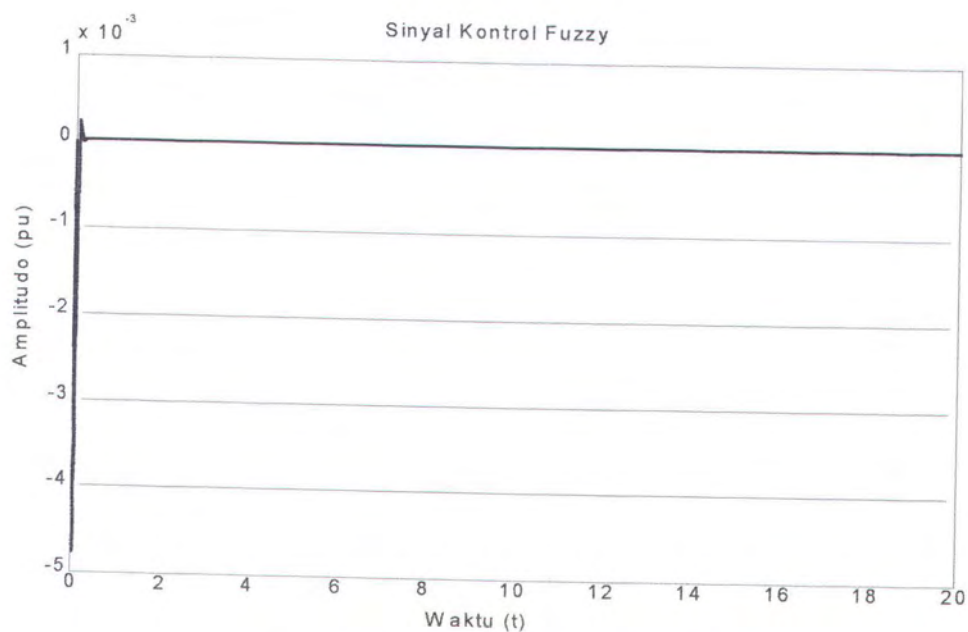
Gambar 4.8 *Perubahan Torsi Sistem*



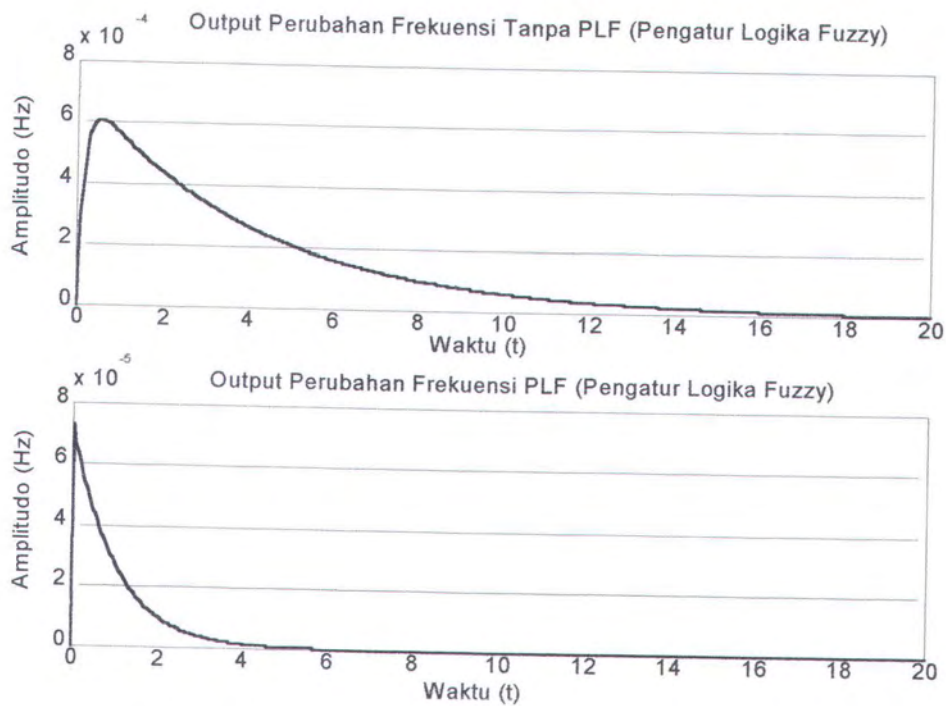
Gambar 4.9 *Perubahan Katup Sistem*



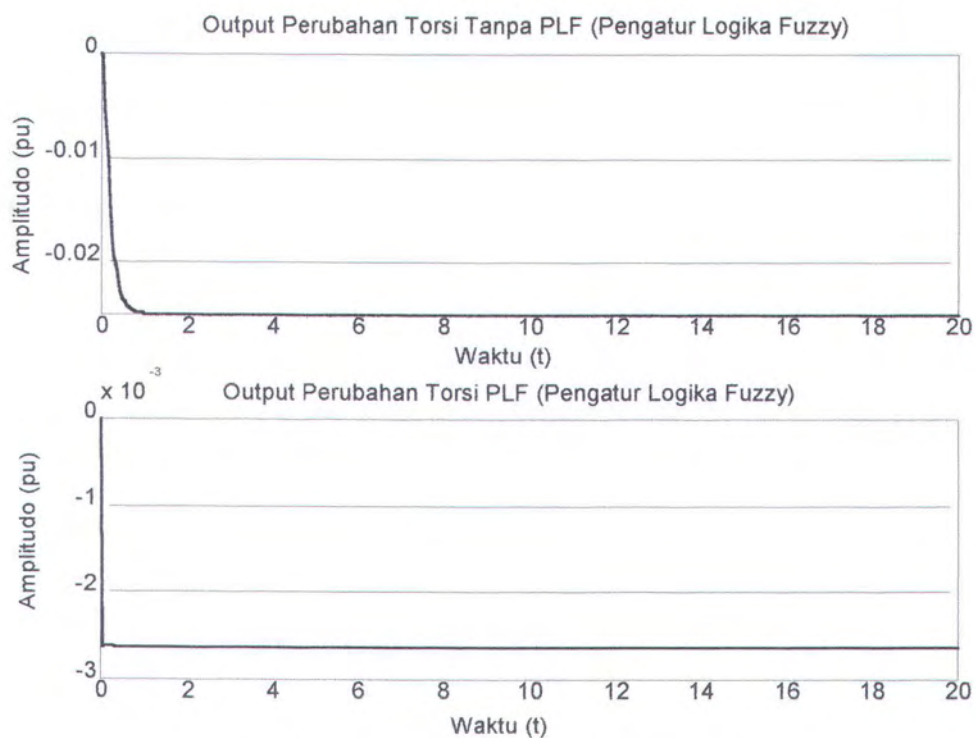
- **Penambahan beban 2,5%**



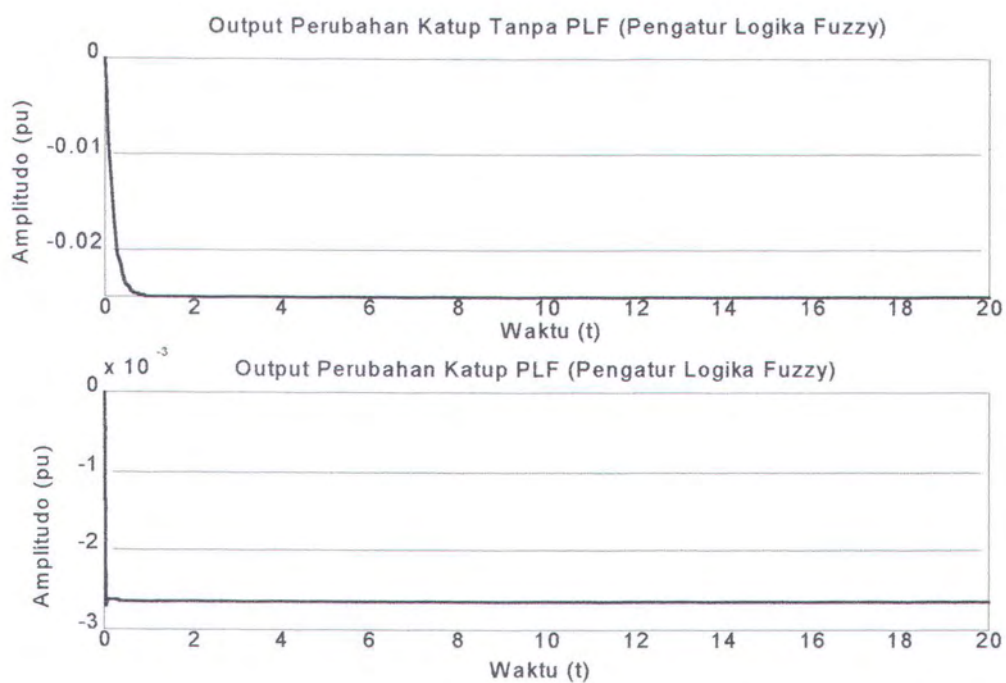
**Gambar 4.10** *Output Sinyal Kontrol Fuzzy*



**Gambar 4.11** *Perubahan Frekuensi Sistem*



**Gambar 4.12** *Perubahan Torsi Sistem*



**Gambar 4.13** *Perubahan Katup Sistem*

Dari gambar 4.2 sampai dengan 4.13 di atas dapat disimpulkan bahwa amplitudo perubahan frekuensi, perubahan torsi dan perubahan katup menurun pada sistem yang menggunakan pengatur logika fuzzy. Sedangkan respon waktu pada sistem dengan PLF juga menjadi lebih pendek dibandingkan dengan sistem tanpa PLF.

Dari gambar 4.2 sampai 4.5 dan gambar 4.10 sampai 4.13 yaitu pada sistem yang diberi perubahan beban sebesar 5% dan 2,5%, penggunaan pengatur logika fuzzy tidak menyebabkan perubahan respon waktu, tetapi menyebabkan mengecilnya simpangan perubahan frekuensi, perubahan torsi dan perubahan katup pada sistem yang diberi perubahan beban 2,5%.

Dari gambar 4.2 sampai 4.5 dan gambar 4.6 sampai 4.9 yaitu pada sistem yang diberi penambahan beban dan pengurangan beban sebesar 5%, terlihat bahwa amplitudo pengurangan beban merupakan kebalikan penambahan beban dengan simpangan perubahan yang sama.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil simulasi dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu :

- Pengatur Logika Fuzzy dapat mengurangi amplitudo maksimal dari perubahan frekuensi yang terjadi akibat gangguan dinamis pada sistem.
- Respon waktu pada sistem dengan pengatur logika fuzzy lebih cepat untuk menuju kestabilan dibandingkan dengan sistem yang tidak menggunakan pengatur logika fuzzy.
- Dari segi perancangan dan penerapannya secara umum, penggunaan PLF memberikan kelebihan yaitu :
  - Untuk merancang PLF tidak memerlukan model matematis plant.
  - Fleksibel dalam menentukan parameter perancangan yang meliputi variabel masukan dan keluaran, fungsi keanggotaan, penentuan kaidah atur sehingga memungkinkan terpenuhinya pertimbangan kerekayasaan tentang kondisi obyek atur.

Tetapi penggunaan metodologi PLF juga memiliki kelemahan yaitu :

- Perancangan memerlukan pengenalan yang mendalam tentang perilaku plant dan juga perilaku pengaturannya.



- Tidak menggunakan prosedur matematis dalam penentuan dan penalaan parameter-parameter penguatannya sehingga memerlukan prosedur coba-coba.

## 6.2 SARAN

Dalam perancangan dan penerapan PLF banyak hal menarik yang perlu dikaji. Salah satunya yang menarik adalah perilaku kontroler yang tidak linier. Hal ini sudah banyak disinggung para peneliti, tetapi penerapannya secara khusus jarang dilakukan. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan untuk merancang secara khusus ketidaklinieran ini dan menerapkannya pada plant yang tidak linier pula.



## DAFTAR PUSTAKA

- 1] Arismunandar, S. Kuwahara, **"Teknik Tenaga Listrik"**, ed. I, Pradnya Paramita, 1991.
- 2] Bambang Rianto, **"Identifikasi dan Pengendalian dengan Logika Fuzzy"**, Seminar AI-94, UPT Komputer PIKSI-ITB, 1994.
- 3] Chuen Chien Lee, **"Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I"**, IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 20 No. 2, Maret/April, 1990.
- 4] Chuen Chien Lee, **"Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part II"**, IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 20 No. 2, Maret/April, 1990.
- 5] Francisco P. Demello and Charles Concordia., **"Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control"**, IEEE Transactions, hal. 189-202, April 1969.
- 6] George J. Klir and Tina A. Folger, **"Fuzzy Sets, Uncertainty and Information"**, Prentice-Hall International, New York, 1988.
- 7] IEEE Committee Report, **"Dynamic Models for Steam and Hydro Turbine in Power System Studies"**, IEEE Transactions, pas-92, pp. 1904-1915, 1973.
- 8] J. Nagrath, D. P. Kothari, **"Modern Power System Analysis"**, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1982.
- 9] Imam Robandi, **"Studi Perbaikan Kinerja Dinamik Sistem Tenaga Listrik Multi Mesin dengan Umpan Balik Optimal"**, Tesis Magister Teknik, ITB., Nopember, 1994.
- 10] Isnuwardianto, **"Dinamika dan Kendali Sistem Tenaga Listrik"**, ITB.
- 11] Katsuhiko Ogata, **"Teknik Kontrol Automatik"**, jilid 1, Erlangga, Jakarta, 1991.
- 12] Katsuhiko Ogata, **"Teknik Kontrol Automatik"**, jilid 2, Erlangga, Jakarta, 1991.

- 13] Kwok L., Tang and Robert J. Mulhaolland, **"Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller"**, IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 21 No. 4, Juli/Agustus, 1991.
- 14] Michio Sugeno, **"Industrial Applications of Fuzzy Control"**, Elsevier Science Publishing B. V., Amsterdam, 1985.
- 15] Mohammad Jamshidi, Nader Vadiie and Timothy J. Ross, **"Fuzzy Logic and Control"**, Prentice-Hall International, New Jersey, 1993.
- 16] Mohammad Rohmanuddin, **"Algoritma Sederhana Suatu Pengontrol Logika Fuzzy dan Aplikasinya pada Pengaturan Posisi"**, Seminar AI-94, UPT Komputer PIKSI-ITB, 1994.
- 17] P. M. Anderson and A. A. Fouad, **"Power System Control and Stability"**, The Iowa State University Press, Iowa, 1982.
- 18] S. S. Vadhera, **"Power System Analysis and Stability"**, Khanna Publisher, New Delhi, India, 1981.
- 19] The New Japan Engineering Consultans Inc., **"Saguling Hydroelectric Power Plant Operation and Maintenance Manual for Generating Equipment"**, Vol. I, Osaka Japan, Juni, 1985.
- 20] William D. Stevenson, **"Elements of Power System Analysis"**, Mcgraw-Hill International Book Company, 1982.

## LAMPIRAN

### Data-data parameter Generator PLTA Saguling (4 Unit) Generator (MITSUBISHI CORP.) :

Type :	semi umbrella, vertical shaft synchronous generator	
rated output :	206,100 kVA	
rated voltage :	16,5 kV	
rated current /phase :	7.212 A	
frequency :	50 Hz	
rated p.f. :	0,85 lag	
number of phase :	3	
sync. speed :	333 rpm	
insulation class :	B	
excitating voltage :	290 V	
excitating current :	1197 A	
efficiency :	guaranteed	test
- pf 1 :		
100 % rated output :	98,3 %	98,4 %
80 %	98,0 %	98,2 %
60 %	97,6 %	97,7 %
40 %	96,0 %	96,8 %
20 %	-	94,0 %
- p.f. 0,85 lag :		
100 %	98,0 %	98,1 %
80 %	97,7 %	97,8 %
60 %	97,1 %	97,3 %
40 %	95,9 %	96,2 %
20 %	-	92,9 %
wave form deviation factor		2,5 %
poles :	9 pasang	
<b>Machine constant :</b>		
<b>Reactance (p.u.) :</b>		
Xq :	0,65	
Xq'' :	0,151	
Xd'' :	0,128 (sscc meth.)	
	0,132 (Da - Ca meth.)	
Xd' :	0,199	
Xd :	0,93 (saturated)	1,09 (unsaturated)
X <sub>2</sub> 1 phase short cct method :	0,134	
Da - Ca method :	0,142	
X <sub>0</sub> :	0,105	




**Time Constant :**

Tdo' :	12,8 s	
Td :	2,2 s	
Td" :	0,063 s	
Ta :	0,20 s	
short circuit ratio :	guaranteed	test
	$\geq 1,0$	1,08
line charging cap. :	$\geq 160$ MVA	190 MVA
voltage regulation :		
1,0 pf :	20 %	16,4 %
0,85 pf :	30 %	22,9 %

**losses at rated op.**

mech. loss :	1717,3 kW
core :	808 kW
armature resistance :	340,2 kW
stray load :	320,1 kW
field resistance :	248,8 kW
exciter :	30,3 kW
total :	3464,9 kW

**Excitation (MELCO) :**

Type :	static
rated exc. capacity :	377 kW
voltage :	290 V
current :	1300 A
ceiling voltage :	
nominal slipping voltage :	244 V
ceiling voltage :	488 V
exciter transformer :	
type :	natural air cooling
rated output cap.	850 kVA
primary volt :	16,5 kV
secondary volt :	420 V
pri/sec connection :	
insulation class :	H
impedance :	10.0 %
initial excitation :	
power source :	DC 110 V
current :	250 A, 30 sec
AVR :	
type :	solid state
range of volt. adl (90R) :	-20 ~ 0 ~ 10 %
manual (70 E) :	30 ~ 110 %
response time :	
	0,1 sec      test
	0,01 sec

**Turbin (Toshiba Corp)**

Type :	vertical shaft, francis type	
rated speed :	333 rpm	
turbine discharge at a net head of 355,7 m	55,0 m <sup>3</sup> /s	model test 54,8 m <sup>3</sup> /s
output at a net head	177,800 kW	
ef. saat beroperasi 333 rpm di bawah net head	guaranteed	model test
output 178.800 kW	93,2 %	93,6 %
143.040	92,5 %	94 %
107.280	89,1 %	91 %
71.520	82,7 %	84,9 %
specific speed at net head :	91,2 m-kW	
max. pressure :	695 m	
max. runaway speed :	590 rpm	570 rpm

inlet valve :  
type of main valve : rotary  
type of bypass valve : needle

governor :  
range of speed drop : 0 - 10%  
sensitivity :  $\pm 0,01$  %  
dead time :  $< 0,25$  s  
permanent magnet gen. :  
type : totally enclosed  
voltage : 110 V  
output : 0,24 kW (300 VA)  
freq. : 50 Hz

turbin :  
max. debit : 56, m<sup>3</sup>/sec.

**Neutral Grouding resistor :**

voltage :  $16,5/\sqrt{3}$  kV  
current : 100 A  
time rating : 30 sec.  
resistance value : 95,3 ohm

(Data berdasarkan buku : **"SAGULING HYDROELECTRIC POWER PLANT OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL FOR GENERATING EQUIPMENT VOL. I"** June 1985, The New Japan Engineering Consultants Inc. , Osaka, Japan )

```

=====
%
DATA-DATA
=====
Kg=18;Tg=0.02;Tt=0.023;R=0.5;Ki=0.5;
h=0.05;Pd=0.05;Kp=0.5;Tp=4;
=====
%MATRIKS VARIABEL KEADAAN A
=====
A=[-1/Tp Kp/Tp 0 0
    2*Kg/(R*Tg) -2/Tt (2/Tt)+(2/Tg) 2*Kg/Tg
    -Kg/(R*Tg) 0 -1/Tg -Kg/Tg
    Ki 0 0 0];
=====
%MATRIKS VARIABEL INPUT B
=====
B=[0 -2*Kg/Tg Kg/Tg 0];
=====
%MATRIKS PENGUKURAN C
=====
C=[1 0 0 0];
C1=[0 1 0 0];
C2=[0 0 1 0];
Bg=[Kp/Tp;0;0;0;];
Vg=[0.05];
Bgg=Bg*Vg;
D=zeros(1,1);
=====
%%PENENTUAN SEMESTA R1, R2, RU
=====
R1=1; % Semesta Masukan ERROR
R2=2; % Semesta Masukan PERUBAHAN ERROR
Ru=1; % Semesta SINYAL ATUR
=====
%BASIS DATA ERROR
=====
Re1(1)=-R1; %NB
Re1(2)=-2*R1/3; %NS
Re1(3)=-R1/3; %NK
Re1(4)=0.0; %NL
Re1(5)=R1/3; %PK
Re1(6)=2*R1/3; %PS
Re1(7)=R1; %PB
=====
%BASIS DATA PERUBAHAN ERROR
=====
Re2(1)=-R2; %NB
Re2(2)=-2*R2/3; %NS
Re2(3)=-R2/3; %NK
Re2(4)=0.0; %NL
Re2(5)=R2/3; %PK
Re2(6)=2*R2/3; %PS
Re2(7)=R2; %PB
=====
%LOOK UP TABLE/ MATRIK KONTROL FUZZY;
=====
RuF=[-Ru -Ru -Ru -Ru -2*Ru/3 -Ru/3 0
    -Ru -Ru -Ru -2*Ru/3 -Ru/3 0 Ru/3
    -Ru -Ru -2*Ru/3 -Ru/3 0 Ru/3 2*Ru/3
    -Ru -2*Ru/3 -Ru/3 0 Ru/3 2*Ru/3 Ru
    -2*Ru/3 -Ru/3 0 Ru/3 2*Ru/3 Ru Ru
    -Ru/3 0 Ru/3 2*Ru/3 Ru Ru Ru

```



```

0 Ru/3 2*Ru/3 Ru Ru Ru Ru];
%=====
%KONDISI AWAL SISTEM
%=====
fo=0;Tmo=0;Yo=0;Ico=0;Uo=0;JUMAT=0.0;JUMBA=0.0;
aa1o=0;aa2o=(h^2)/2;aa3o=h*((h/2)+(h^2)/4);aa4o=h*(h*((h^2)/2)+(h^2)/4);
bb1o=0;bb2o=(h^2)/2;bb3o=h*((h/2)+(h^2)/4);bb4o=h*(h*((h^2)/2)+(h^2)/4);
cc1o=0;cc2o=(h^2)/2;cc3o=h*((h/2)+(h^2)/4);cc4o=h*(h*((h^2)/2)+(h^2)/4);
dd1o=h*((Kp/Tp)*Pd);dd2o=dd1o+h*((h/2)+dd1o/2);dd3o=dd1o+h*((h/2)+dd2o/2);dd4o=d
d1o+h*(h+dd3o);
dfo=aa1o+2*aa2o+2*aa3o+aa4o;dTmo=bb1o+2*bb2o+2*bb3o+bb4o;
dYo=cc1o+2*cc2o+2*cc3o+cc4o;dIco=dd1o+2*dd2o+2*dd3o+dd4o;
f(1)=fo+dfo; Tm(1)=Tmo+dTmo; Y(1)=Yo+dYo; Ic(1)=Ico+dIco;
%=====
%PERHITUNGAN SISTEM TANPA DAN DENGAN PENALAAAN PSS
%=====
for K=2:5000;
aa1(K-1)=h*((-f(K-1)/Tp)+(Kp*Tm(K-1)/Tp));
aa2(K-1)=aa1(K-1)+h*((h/2)+(aa1(K-1)/2));
aa3(K-1)=aa1(K-1)+h*((h/2)+(aa2(K-1)/2));
aa4(K-1)=aa1(K-1)+h*(h+aa3(K-1));
df(K-1)=aa1(K-1)+2*aa2(K-1)+2*aa3(K-1)+aa4(K-1);
f(K)=df(K-1)+f(K-1);
bb1(K-1)=h*((2*Kg*f(K-1)/(R*Tg))-(2*Tm(K-1)/Tt)+((2/Tt)+(2/Tg))*Y(K-
1))+ (2*Kg*Ic(K-1)/Tg)-(2*Kg*Uo(K-1)/Tg));
bb2(K-1)=bb1(K-1)+h*((h/2)+(bb1(K-1)/2));
bb3(K-1)=bb1(K-1)+h*((h/2)+(bb2(K-1)/2));
bb4(K-1)=bb1(K-1)+h*(h+bb3(K-1));
dTm(K-1)=bb1(K-1)+2*bb2(K-1)+2*bb3(K-1)+bb4(K-1);
Tm(K)=dTm(K-1)+Tm(K-1);
cc1(K-1)=h*((-Kg*f(K-1)/(R*Tg))-(Y(K-1)/Tg)-(Kg*Ic(K-1)/Tg)+(Kg*Uo(K-1)/Tg));
cc2(K-1)=cc1(K-1)+h*((h/2)+(cc1(K-1)/2));
cc3(K-1)=cc1(K-1)+h*((h/2)+(cc2(K-1)/2));
cc4(K-1)=cc1(K-1)+h*(h+cc3(K-1));
dY(K-1)=cc1(K-1)+2*cc2(K-1)+2*cc3(K-1)+cc4(K-1);
Y(K)=dY(K-1)+Y(K-1);
dd1(K-1)=h*(Ki*f(K-1));
dd2(K-1)=dd1(K-1)+h*((h/2)+(dd1(K-1)/2));
dd3(K-1)=dd1(K-1)+h*((h/2)+(dd2(K-1)/2));
dd4(K-1)=dd1(K-1)+h*(h+dd3(K-1));
dIc(K-1)=dd1(K-1)+2*dd2(K-1)+2*dd3(K-1)+dd4(K-1);
Ic(K)=dIc(K-1)+Ic(K-1);
%=====
%PENENTUAN ERROR DAN PERUBAHAN ERROR
%=====
elo=0.0;dref=0.0;e2o=0.0;e1(1)=dref-f(1);e2(1)=e1(1)-elo;
e1(K)=dref-f(K);b1=R1/3;b2=R2/3;
e2(K)=e1(K)-e1(K-1);
if (e1(K)>R1),
    e1(K)=R1;
elseif (e1(K)<-R1),
    e1(K)=-R1;
end
if (e2(K)>R2),
    e2(K)=R2;
elseif (e2(K)<-R2),
    e2(K)=-R2;
end
%-----
for I=1:17

```



```

if e1(K)>(Re1(I)-b1)&e1(K)<=(Re1(I)+b1),
    alf1(I)=1-(sqrt((e1(K)-Re1(I))^2)/b1);
else
    alf1(I)=0;
end
for J=1:1:7
    if e2(K)>(Re2(J)-b2)&e2(K)<=(Re2(J)+b2),
        alf2(J)=1-(sqrt((e2(K)-Re2(J))^2)/b2);
    else
        alf2(J)=0;
    end
    alf=min(alf1(I),alf2(J));
    JUMAT=JUMAT+alf*RuF(I,J);
    JUMBA=JUMBA+alf;
end
end
=====
DEFUZZIFIKASI DENGAN METODE COA
=====
Uo(K)=JUMAT/JUMBA;
Uo(K)=Uo(K)+Uo(K-1);
end
end
UO=Uo(K);
F=[UO UO UO UO];
f=A-(Bgg*KF)
F=4*af
feigen=eig(AF)

figure(1)
t=0:0.05:20;
[num,den]=ss2tf(AF,Bgg,C,D,1);
[y,x]=step(num,den,t);
x=-KF*x';
plot(t,U(1,:))
title(' Sinyal Kontrol Fuzzy')
label(' Waktu (t)')
label(' Amplitudo (pu)')
grid

figure(2)
t=0:0.05:20;
[y,x]=step(A,Bgg,C,D,1,t);
x=x';
=C*x;
subplot(211),plot(t,Y(1,:))
title('Output Perubahan Frekuensi Tanpa PLF (Pengatur Logika Fuzzy)')
label(' Waktu (t)')
label(' Amplitudo (Hz)')
grid

t=0:0.05:20;
[y,x]=step(AF,Bgg,C,D,1,t);
x=x';
=C*x;
subplot(212),plot(t,Y(1,:))
title('Output Perubahan Frekuensi PLF (Pengatur Logika Fuzzy)')
label(' Waktu (t)')
label(' Amplitudo (Hz)')
grid

```

```

figure(3)
t=0:0.05:20;
[y,x]=step(A,Bgg,C,D,1,t);
x=x';
Y=C1*x;
subplot(211),plot(t,Y(1,:))
title('Output Perubahan Torsi Tanpa PLF (Pengatur Logika Fuzzy)')
xlabel(' Waktu (t)')
ylabel(' Amplitudo (pu)')
grid

```

```

t=0:0.05:20;
[y,x]=step(AF,Bgg,C,D,1,t);
x=x';
Y=C1*x;
subplot(212),plot(t,Y(1,:))
title('Output Perubahan Torsi PLF (Pengatur Logika Fuzzy)')
xlabel(' Waktu (t)')
ylabel(' Amplitudo (pu)')
grid

```

```

figure(4)
t=0:0.05:20;
[y,x]=step(A,Bgg,C,D,1,t);
x=x';
Y=C2*x;
subplot(211),plot(t,Y(1,:))
title('Output Perubahan Katup Tanpa PLF (Pengatur Logika Fuzzy)')
xlabel(' Waktu (t)')
ylabel(' Amplitudo (pu)')
grid

```

```

t=0:0.05:20;
[y,x]=step(AF,Bgg,C,D,1,t);
x=x';
Y=C2*x;
subplot(212),plot(t,Y(1,:))
title('Output Perubahan Katup PLF (Pengatur Logika Fuzzy)')
xlabel(' Waktu (t)')
ylabel(' Amplitudo (pu)')
grid

```

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama : ROCHIM

Lahir di Mojokerto pada tanggal 30 Oktober 1971  
sebagai anak keenam dari delapan bersaudara.

Ayah : KAERAN

Ibu : SITI ROCHANAH

Pendidikan yang telah ditempuh :

1. TK Bhayangkari Waru, tahun 1977-1978
2. SD Bhayangkari Waru, tahun 1978-1984
3. SMPN I Taman, tahun 1984-1987
4. SMAN I Sidoarjo, tahun 1987-1990
5. Terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS sejak tahun 1990 dengan Nrp. 2290 100 115

Selama menjadi mahasiswa aktif menjadi asisten praktikum di bidang studi  
Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS

Surabaya, Maret 1998

Penulis